2024 March

글로벌 원전 시장 보고서

Global Nuclear Supply Chain Analysis

원전 공급망 분석 보고서

원전수출정보시스템
(K-neiss)

한국원전수출산업협회 KNA

Ⅰ. 서론

1. 세계 원자력 발전 현황
2. 세계 원자력 발전 전망

Ⅱ. 부문별 원자력 공급망

1. 신규 원전 건설
2. 소형모듈원자로
3. 계속운전
4. 해체 및 폐기물 관리

Ⅲ. 원자로 공급업체 및 공급망

1. 원자로 소유기업 및 개발기업
2. 주요 원자로 공급업체
3. NSSS 구성요소 및 시스템 업체

Ⅳ. 원자력 공급망 인프라

1. 공급망 인프라 산업
2. 원전 건설·운전 주요 원자재
3. 공급 현지화 및 글로벌화
4. 공급망 운영 및 최적화

Ⅴ. 결론 및 시사점

Ⅰ. 서론

1. 세계 원자력 발전 현황
2. 세계 원자력 발전 전망

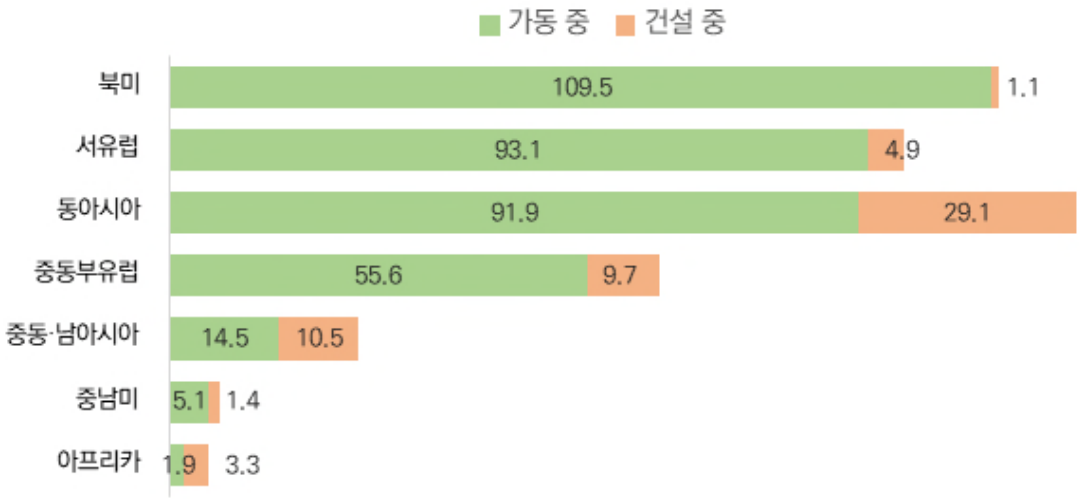
1. 세계 원자력 발전 현황

2023년 말 기준 전 세계 438기의 원자로 중 413기가 가동 중이며 설비용량으로는 총 37만 1,510MWe 규모임. 총 5만 9,867MWe 규모의 원자로 58기가 추가로 건설 중이며,[1] 100기 이상의 원자로가 계획 단계에 있음[2]

과거 원자력 발전의 성장은 주로 유럽, 북미, 동아시아 선진국을 중심으로 이루어졌으나, 이제 다른 아시아 지역, 특히 걸프 지역과 인도 아대륙 등의 신흥 경제국으로 그 중심이 옮겨가고 있음. 서구권 국가의 경우 일부 노후 원전의 가동 중단 및 교체 수요, 새로운 성장 지역으로의 산업 활동 이전 등에 따라 원전 건설과 개보수가 계속되고 있음

현재 가동 중인 원전 규모가 가장 큰 국가는 미국으로 총 9만 5,835MW의 원자로 93기를 가동 중에 있으며 프랑스, 중국, 러시아, 한국이 뒤를 잇고 있음. 가장 많은 규모의 원전을 건설 중인 국가는 중국으로 총 2만 3,724MW의 원자로 23기를 건설 중임. 또한 새롭게 원전 가동 국가 대열에 합류할 예정인 국가로는 튀르키예, 이집트, 방글라데시가 있음

[표] 전 세계 지역별 원전 규모 (2023) (단위: GW)



출처: IAEA PRIS

1) IAEA PRIS (Power Reactor Information System)
2) World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 국가별 원전 가동·건설 현황

국가명	가동 중		건설 중	
	설비용량(MW)	원자로 수(기)	설비용량(MW)	원자로 수(기)
미국	95,835	93	1,117	1
프랑스	61,370	56	1,630	1
중국	53,181	55	23,724	23
러시아	27,727	37	2,700	3
한국	25,829	26	2,680	2
캐나다	13,624	19		
우크라이나	13,107	15	2,070	2
일본	11,046	12	2,653	2
스페인	7,123	7		
스웨덴	6,937	6		
인도	6,290	19	6,028	8
영국	5,883	9	3,260	2
핀란드	4,394	5		
아랍에미리트	4,011	3	1,310	1
체코	3,934	6		
벨기에	3,928	5		
파키스탄	3,262	6		
스위스	2,973	4		
슬로바키아	2,308	5	440	1
벨라루스	2,220	2		
불가리아	2,006	2		
헝가리	1,916	4		
브라질	1,884	2	1,340	1
남아프리카공화국	1,854	2		
아르헨티나	1,641	3	25	1
멕시코	1,552	2		
루마니아	1,300	2		
이란	915	1	974	1
슬로베니아	688	1		
네덜란드	482	1		
아르메니아	416	1		
튀르키예			4,456	4
이집트			3,300	3
방글라데시			2,160	2
합계	371,510	413	59,867	58

출처: IAEA PRIS

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

노형별 원전 가동 현황

원자력 기술은 1950년대 이후 상당히 발전함. 핵증기공급계통(NSSS)의 기본 기능은 대체로 변하지 않았으나, 관리 및 운영을 포함한 발전 프로세스의 신뢰성과 효율성은 크게 향상됨. 민간 원자력 발전의 역사에서 다양한 원자로 설계가 건설 및 시험되어 왔음. 일부 설계는 개념설계나 프로토타입 단계를 넘어서지 못했으나, 일부는 널리 보급되어 현재 가동 중인 원자로의 대부분을 구성하고 있음

원자로 유형은 주로 감속재, 1차 냉각재, 또는 연료에 따라 구분됨. 2023년 가동 중인 원전 설비용량의 약 90%는 경수로(LWR) 노형으로 구성되어 있으며 이 중 80% 이상이 가압경수로(PWR)[3]임. 세 가지 주요 노형인 PWR, 비등수형원자로(BWR)[4], 가압중수로(PHWR)[5]가 2023년 가동 중인 전체 원자로의 95% 이상을 차지하고 있음

초기 원자로의 경우, 개별 원자로의 맞춤화 수준이 높아 원자로 각각이 본질적으로 고유한 특징을 지니고 있었음. 그러나 원자로 관리에 있어 표준화의 이점이 분명해지면서 원전 운영업체와 원자로 공급업체는 점차 유사한 원자로를 건설하게 됨. 이에 따라 원자로 노형이라는 개념이 보편화되었음. 원자로는 설계의 정교함에 따라 세대별로도 구분이 가능하지만, 그 경계를 엄밀하게 정의하기는 어려움

[표] 전 세계 가동 원전 노형별 현황 (2023)

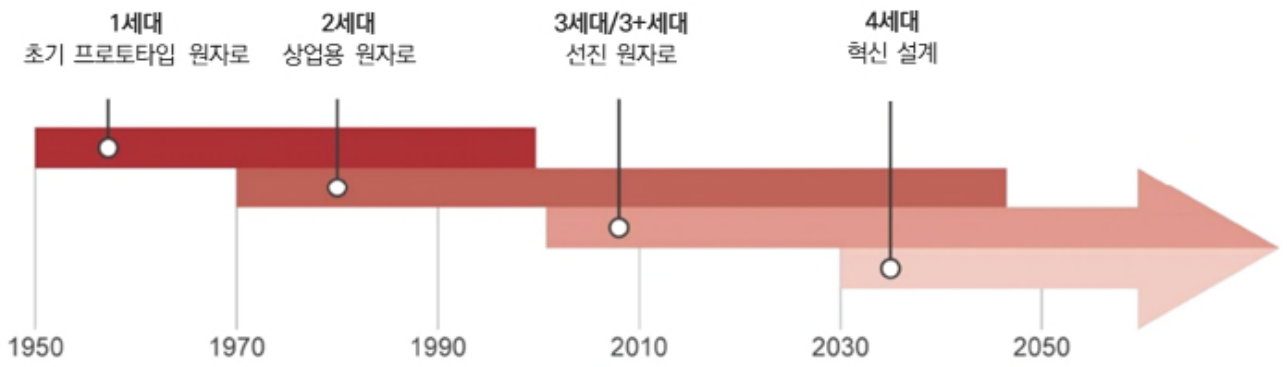
노형	주요 국가	원자로 수(기)	설비용량(GW)	연료	냉각재	감속재
가압경수로(PWR)	미국, 프랑스, 일본, 러시아, 중국, 한국	304	290,648	농축 UO_2	경수	경수
비등수형원자로(BWR)	미국, 일본, 스웨덴	41	43,071	농축 UO_2	경수	경수
가압중수로(PHWR)	캐나다, 인도	46	24,093	천연 UO_2	중수	중수
신형가스냉각로(AGR)[6]	영국	11	7,433	천연 U(금속), 농축 UO_2	CO_2	흑연
흑연감속경수로(LWGR)[7]	러시아	8	4,685	농축 UO_2	경수	흑연
고속증식로(FBR)[8]	러시아	2	1,380	PuO_2, UO_2	액체 나트륨	없음
고온가스냉각원자로(HTGR)[9]	중국	1	200	농축 UO_2	헬륨	흑연
합계		413	371,510			

출처: IAEA PRIS

3) Pressurized Water Reactor
4) Boiling Water Reactor
5) Pressurized Heavy Water Reactor
6) Advanced Gas Reactor
7) Light Water-Cooled Graphite-Moderated Reactor
8) Fast Breeder Reactor
9) High Temperature Gas-cooled Reactor

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[그림] 원자로의 세대 진화



출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

1세대 원자로는 1950~1960년대에 미국, 러시아, 프랑스, 영국에서 개발된 초기 프로토타입 원자로임. 마지막 1세대 원자로는 영국에서 2015년 가동이 영구정지됨. 1세대 원자로를 가동하면서 얻은 교훈은 1970~1980년대에 개발된 2세대 대형 상업용 원자로 설계에 반영됨. 현재 미국, 유럽, 러시아, 일본 등에서 가동 중인 대부분의 원자로는 2세대 원자로이지만, 이후 기술 및 안전 분야의 발전이 반영되면서 상당한 개조가 이루어짐. 이들 중 상당수는 이미 가동연한을 넘긴 후 계속운전에 들어갔음. 주요 2세대 원자로 노형은 △가압경수로(PWR) △비등수형원자로(BWR) △가압중수로(PHWR) △신형가스냉각로(AGR) △흑연감속비등경수로(RBMK) 등이 있음

1990년대 이후 더욱 극심한 내외부 위험에 대응할 수 있도록 첨단 안전 기능을 갖춘 3세대 원자로가 개발됨. 설계수명은 60년이며, 운영 경제성이 개선됨. 일부 원자로 기술 공급업체는 추가적인 기능을 강조하기 위해 자사 모델을 '3+세대'로 지칭함. 현재 아래 표와 같은 여러 3세대/3+세대 원자로가 가동 중임

[표] 주요 3세대/3+세대 원자로

모델	노형	용량(총)	개발사	특징
EPR	PWR(4루프)	1,750MW	EDF/Framatome (프랑스)	프랑스 N4모델의 특징을 가진 독일 Konvoi 노형에서 파생
AP1000	PWR(2루프)	1,250MW	Westinghouse (미국)	여러 피동 안전 기능 탑재
ABWR	BWR	1,380MW	GE-Hitachi/Toshiba (미국/일본)	1996~1997년 상업운전에 들어간 일본 가시와자키-가리와 6·7 원전 2기가 최초의 3세대 원자로로 간주
APR1400	PWR(2루프)	1,450MW	한국수력원자력	미국 System 80+ 노형에 기초
VVER-1200	PWR(4루프)	1,200MW	Rosatom (러시아)	경제적 성능과 안전성을 대폭 향상
Hualong One /HPR1000	PWR(3루프)	1,170MW	CNNC/CGN (중국)	중국 자체개발 3세대 노형으로 2021년 1월 상업운전 개시(중국 푸칭 원전)

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

또한 여러 국가에서 4세대 원자로 개발을 추진하고 있음. 일반적으로 이러한 4세대 원자로는 설계 또는 R&D 단계에 있으나, 일부 프로토타입 또는 실증 원자로는 2030년 이전에 시운전에 들어갈 것으로 예상됨. 4세대 원자로의 대규모 산업현장 도입은 2040년경에 이루어질 것으로 전망됨. 대부분의 4세대 원자로 설계는 물을 사용하지 않는(non-water) 냉각재, 높은 가동 온도, 높은 원자로 출력 밀도, 경우에 따라 연료주기 또는 화학 시설과의 통합 등을 특징으로 함. 4세대 원전 시스템에는 원자로와 에너지 변환 시스템뿐만 아니라 관련 연료 주기 기술도 포함됨. 이는 △재처리 및 사용후핵연료 분리에 기반한 폐쇄형 핵연료 주기 △고속 스펙트럼 원자로(Fast-spectrum reactor)를 통한 우라늄 자원 사용 효율성 개선 및 고준위 방사성폐기물 저감 △민감한 물질의 확산 저항성 강화 등을 기대할 수 있음

소형모듈원자로(SMR)

1950년대 이후 원자로 1기당 용량은 약 60MWe에서 1600MWe 이상으로 증가했으며, 그에 따른 규모의 경제도 실현됨. 동시에 해군용 소형 원자로 수백 기를 건설하며 소형 원자로 엔지니어링에 대한 상당한 경험도 축적됨. 세계원자력협회(WNA)는 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)를 일반적으로 약 300MWe 용량 이하의 원자로로 정의함. SMR은 모듈식 공장 제조용으로 설계되어 연속 생산의 경제성과 건설 시간 단축을 제공함. 또한 SMR 설계는 단순성, 피동 안전 기능, 확산 저항성, 부지 선정의 유연성이 특징임. 또한 △건설 공정의 간소화 및 소규모 그리드 통합에 적합 △건설에 필요한 공간이 적어 인구 밀집 지역 및 산업 지역 인근에 배치 가능 △인프라 필요성 감소 △지역난방, 담수화, 수소 생산 등 다양한 응용분야 지원 가능 등 여러 장점을 보유함

중국, 러시아, 미국 및 기타 여러 국가에서 이미 많은 SMR 프로젝트가 상당한 진전을 보이고 있음. 이러한 프로젝트는 다양한 원자로 기술과 설계로 구성되어 유연하게 적용할 수 있음. 예를 들어, 러시아에서 설계한 KLT-40S는 바지선 기반의 부유식 원전임. SMR은 여러 신흥 국가에서 도입할 것으로 예상되며, 현재 대부분의 SMR은 설계 또는 인허가 단계에 있음. 그러나 도입 시기 및 속도에 대해서는 정확한 예측이 어려워 개발 진행 경로는 아직 불확실하다는 점에 유의할 필요가 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

원자력 발전의 성장 동력

탄소 배출량 목표 달성 과제의 시급성이 전 세계적으로 점차 급박해지고 있는 가운데, 2022년 전 세계 대부분의 지역에서는 에너지 가격이 사상 최고치를 기록했으며 많은 지역에서 에너지 안보를 유지하기 위해 고심하고 있음. 이로 인해 에너지 생산·소비 부문에서 비용을 절감하는 동시에 탄소 배출을 줄이거나 전혀 배출하지 않는 대안으로 전환하는 것이 어려워진 상황임. 또한 코로나19 팬데믹의 영향, 기후변화의 위협에 대처하기 위한 정책 변화, 지정학적 긴장, 기술 발전으로 인해 상당한 시장 변동성이 발생하고 있음

원자력 발전은 이러한 여러 도전과제를 해결하는 데 있어 핵심적인 도구로 간주되며 지속 가능한 개발에 매우 중요함. 유엔 정부간기후변화협의체(The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)의 'Global Warning of 1.5℃' 보고서는 저탄소 에너지 시스템으로의 전환을 통해 온실가스 배출을 줄여야 한다고 강조한 바 있음. IPCC 보고서는 원자력 발전이 직접 배출량과 수명주기 전체를 모두 고려할 때 탄소 배출량이 가장 낮은 발전 형태 중 하나라고 밝힘. 또한 지구 온난화를 산업화 이전 수준 대비 1.5°C 상승으로 제한하기 위해서는 원자력 에너지의 비중이 증가해야 한다는 결론을 내림

특히 원자력 에너지와 같이 안정적이고 저렴한 에너지에 대한 접근성은 지속 가능한 발전에 있어 매우 중요한 요소로 인식되고 있음. 원자력은 많은 국가에서 가장 저렴한 비용으로 전기를 생산할 수 있는 수단 중 하나임. 국제에너지기구(IEA), OECD 원자력기구(NEA) 등의 연구에 따르면, 가변적인 재생에너지에 크게 의존하는 발전 믹스에 비해 원자력 발전의 비중을 높여 동일한 배출량 감축을 달성할 경우 총 전기 비용이 더 낮아지는 것으로 나타났음. 원자력은 전 세계에 청정에너지 시스템으로의 전환을 경제적이고 안정적으로 관리할 수 있는 기회를 제공함. 저탄소 에너지를 저렴하게 공급하는 원자력 발전 기술은 잘 입증된 기술로, 우호적인 정책 환경 하에서 빠르게 확대될 수 있음. 이에 따라 새로운 비즈니스 모델, 기술, 자금조달 메커니즘, 정책적 인센티브는 장기적으로 지속 가능한 원자력 공급망을 달성하는 데 있어 핵심적인 역할을 할 것으로 전망됨[10)]

10) World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

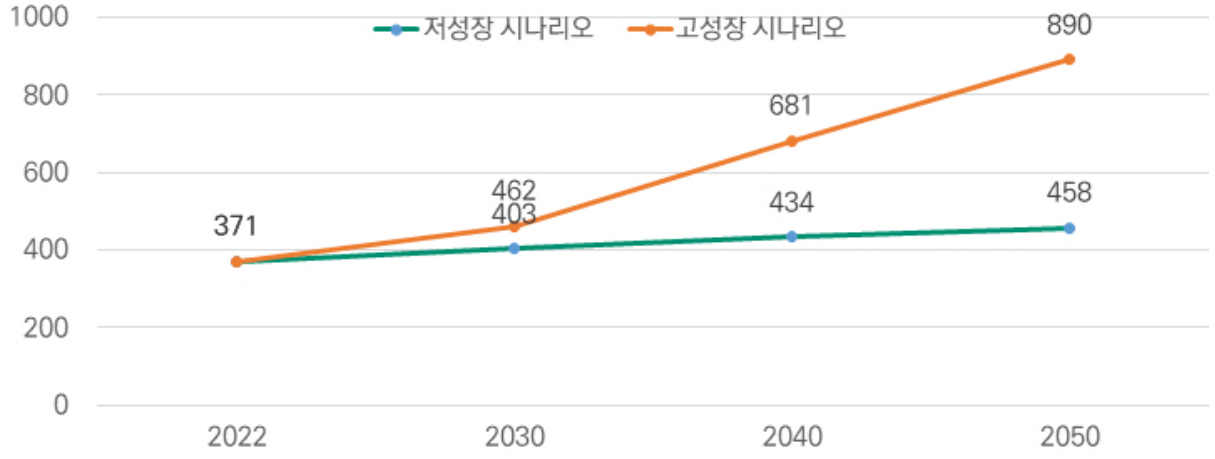
copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

2. 세계 원자력 발전 전망

원자력 에너지의 활용은 전기화 증가, 에너지 안보에 대한 새로운 관심, 에너지 공급과 관련된 탄소 배출 및 환경 영향을 줄이기 위한 정책에 힘입어 장기적으로 증가할 것으로 전망됨. 인구 및 경제 성장이 장기적인 에너지 수요의 동인이 될 것으로 예상되는 가운데, 지구 온난화와 지속 가능한 개발에 대한 우려가 에너지 공급의 성격을 규정하는 데 영향을 미치고 있음. 각국 정부는 탄소 배출의 상한선과 규제 및 목표를 계속해서 강화할 것으로 예상됨. 이러한 추세는 원자력을 포함한 저탄소 에너지원에 유리한 정책 환경을 제공할 수 있음

국제원자력기구(IAEA)는 전 세계 발전 설비용량이 2030년까지 2022년 대비 약 22% 증가한 후 2050년까지 약 2배 증가할 것으로 전망함. 원자력 발전 설비용량은 고성장 시나리오의 경우 2030년까지 2022년 대비 약 24% 증가하고, 2050년에는 약 140% 증가할 것으로 예측함. 반면 저성장 시나리오에서는 2030년까지 2022년 대비 약 9% 증가, 2050년 약 23% 증가할 것으로 예상함. 2022년 기준 전 세계 발전 설비용량에서 원자력 발전 비중은 약 4.5%이나 저성장 시나리오에서는 2050년 2.8%로 약 1.7%p 감소를 예상한 반면, 고성장 시나리오에서는 약 5.4%로 약 1%p 증가할 것으로 예측함[11)]

[표] 전 세계 원자력 발전 설비용량 전망 단위: GW



발전 설비용량	2022	2030		2040		2050	
		저성장	고성장	저성장	고성장	저성장	고성장
전체	8,281	10,079		12,841		16,590	
원자력	371.4	403	462	434	681	458	890
원자력 비중(%)	4.5%	4.0%	4.6%	3.4%	5.3%	2.8%	5.4%

출처: IAEA, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2023.

11) IAEA, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2023.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

2022년 기준 지역별 원자력 발전 설비용량은 북미, 북·서·남유럽, 중앙·동아시아, 동유럽, 남아시아, 중남미, 서아시아, 아프리카 순임. 그러나 IAEA의 예측 시나리오에 따르면 중앙·동아시아 지역의 약진이 전망됨. 2022년 기준 89GW의 원자력 발전 설비용량을 보유한 해당 지역은 2050년 저성장 시나리오의 경우 192GW, 고성장 시나리오의 경우 345GW로 2배 이상에서 4배 가까이 되는 강항 성장세를 보일 것으로 전망됨[12)]

[표] 지역별 원자력 발전 설비용량 전망 단위: GW

구분	2022	2030		2040		2050	
		Low	High	Low	High	Low	High
전 세계	371.4	403	462	434	681	458	890
북미	108.0	105	112	88	128	67	156
북·서·남유럽	99.0	88	90	72	114	60	131
중앙·동아시아	89.0	125	157	161	255	192	345
동유럽	53.0	52	59	51	90	59	102
남아시아	11.0	17	26	33	50	42	74
중남미	5.1	6	6	8	13	12	25
서아시아	4.4	8	9	12	19	14	24
아프리카	1.9	2	3	8	11	9	20
동남아시아	(-)	(-)	(-)	1	1	3	11
오세아니아	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	2

출처: IAEA, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2023.

시장 규모 예측

세계원자력협회(WNA)는 국제에너지기구(IEA)의 전력 가격 예측을 기반으로 2040년까지의 원전 발전량 및 매출액 전망치를 추산함. 이에 따르면 2020년 기준 전 세계 원전 발전량은 2,717TWh, 매출액은 2,950억 달러였으며, 일반 시나리오에서는 2040년까지 전 세계 원전 매출액이 약 5,730억 달러로 2020년 대비 거의 2배 증가할 것으로 전망됨. 반면 고성장 시나리오에서는 2.5배 이상인 7,700억 달러로 성장하고 특히 비(非) OECD 국가의 성장률은 4배가 넘을 것으로 예측함[13)]

[표] 2020~2040년 원전 발전량 및 매출액 전망치

구분		2020	2025		2030		2035		2040	
			일반	고성장	일반	고성장	일반	고성장	일반	고성장
OECD	발전량(TWh)	1,933	1,883	1,991	1,831	2,083	1,794	2,238	1,928	2,529
	매출액($십억)	232	291	308	348	395	350	437	389	510
비(非)OECD	발전량(TWh)	784	951	988	1,375	1,726	1,885	2,536	2,585	3,640
	매출액($십억)	64	74	77	104	130	137	185	184	259
글로벌	발전량(TWh)	2,717	2,834	2,979	3,206	3,809	3,679	4,774	4,513	6,169
	매출액($십억)	295	365	385	451	525	488	622	573	770

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

12) IAEA, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, 2023.
13) World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

시장 성장의 새로운 기회

현재 민간 원자력 에너지 부문은 거의 전적으로 전력 생산에 주력하고 있음. 전력 시장은 향후 수십 년 동안 원전 소유주들의 주요 수입원 역할을 할 것임. 그러나 원전에서 생산되는 열에너지의 대부분은 아직 제대로 활용되지 못하고 있음. 냉각수의 온도를 환경적 영향이 없는 수준까지 낮춰서 배출하려면 비용이 발생하며, 이와 더불어 국가 및 기업의 탈탄소화 목표는 원자력 부문에 많은 기회를 제공할 것으로 전망됨. 따라서 원자력 발전에 수반되는 열에너지는 향후 큰 성장 분야로 예상됨. 이는 원자력 부문의 밸류체인을 더욱 성장시키고 원자력 프로젝트와 관련된 공급망을 확대하는 효과로 이어질 수 있음

현재 지역난방, 일부 산업 공정열, 담수화 등 발전 이외의 용도로 원자로를 이용하는 여러 사례가 존재함. 2021년 말 기준, 약 2,200GWh 규모의 원자로 61기가 발전 이외 용도로 적어도 부분적으로 사용된 것으로 나타남.[14] 이 가운데 89%는 유럽, 나머지 11%는 아시아 지역에서 지역난방, 산업 공정열, 담수화 등에 사용됨

건물 난방 수요는 전 세계 에너지 사용량의 약 1/3(127EJ[15])을 차지함. 이 수요의 약 1/3은 화석연료, 1/3은 전기로 공급되는데, 전기 역시 여전히 대부분 화석연료에 의존하고 있음. 이 중 일부를 원자력으로 대체하면 각국이 온실가스 배출량을 줄이는 데 큰 도움이 될 것으로 기대됨. 예를 들어, 핀란드의 경우 지역난방이 잘 구축되어 있지만 그 중 약 절반을 화석연료로 충당하고 있음. 지역난방 시스템은 경제성 요인으로 인해 열 공급원과 상당히 근접해야 하므로 기존의 원전은 어려움이 있으나, SMR은 이러한 한계를 극복할 수 있을 것으로 주목됨. 핀란드 전체 지역난방 수요의 60%를 차지하는 9개 지역의 각 수요는 적절한 규모의 SMR(약 150~900MWt)로 충족될 수 있음

수소 경제 역시 발전 이외에 원자력 에너지를 활용할 수 있는 잠재 시장임. IEA는 탄소 중립 달성을 위해 수소가 중요한 역할을 할 것으로 보고 있음. 수소는 암모니아나 합성 항공연료와 같은 다른 제품을 생산하거나, 철강 부문과 같이 에너지 집약적인 산업을 탈탄소화하기 위한 방안으로 활용될 수 있음. 현재 거의 모든 수소 생산은 천연가스의 증기 개질을 통해 이루어지고 있음. IEA는 2030년까지 이 비율이 절반으로 줄어들고 수전해를 통해 생산되는 수소가 엇비슷한 비중을 차지하게 될 것으로 전망함. 원자력 발전은 전기분해에서도 중요한 역할을 할 수 있지만, 증기개질[16]을 통한 수소 생산의 경제성에도 도움이 될 수 있음. 이 공정에는 약 700~1,000℃의 증기가 필요한데, 원자로를 이용한 열에너지가 화석연료 연소를 대체 가능함

14) World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.
15) 엑사줄(EJ): 에너지량의 단위로 10의 18승줄, 줄은 1W전구의 1초간 소비량
16) 촉매의 존재하에 탄화수소와 수증기를 고온에서 반응시켜 수소 또는 합성 가스, 메탄을 합성하는 방법

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

Ⅱ. 부문별 원자력 공급망

1. 신규 원전 건설
2. 소형모듈원자로
3. 계속운전
4. 해체 및 폐기물 관리

1. 신규 원전 건설

시장 규모

원자력 공급망의 여러 부문은 신규 원전 건설, 기존 원전의 운전 및 정비(O&M), 노후 원자로의 계속운전, 해체 및 폐기물 관리 등 원전의 전체 수명 주기의 다양한 단계를 구성함. 현재 원전 도입에 관심이 있거나 계획 중인 국가는 30개국이 넘으며, 지난 10년간 방글라데시, 이집트, 터키, 아랍에미리트(UAE) 등 4개국이 첫 원전 건설에 착수함. UAE의 바라카(Barakah) 원전 4기 중 3기는 2022년 운전을 시작했고, 4호기가 2024년에 가동을 시작할 예정임. 이 밖에도 인도네시아, 케냐, 폴란드, 사우디아라비아, 우즈베키스탄 등 원전 신규 도입 가능성이 있는 국가들이 있음

원전 도입을 고려하고 있는 국가는 선진국을 위한 대량 생산 상품과 서비스를 생산하는 신흥 경제국이 다수임. 빠른 성장세를 보이는 이들 국가는 저렴하고 안정적인 전력 공급이 필요하지만, 자본 시장의 자금조달 역량이 부족하여 외부 투자자 및 국제 개발 금융기관으로부터의 자금조달이 필요할 수도 있음. 경우에 따라서는 선진국의 원자로 공급업체가 필요한 기술적·재정적·조직적 자원을 동원하고 선진국 정부와 국제 개발 금융기관이 이들 국가의 원전 프로젝트를 지원하도록 설득해야 할 수도 있음. 소형모듈원자로(SMR)는 기가와트급(GW) 원자로에 비해 건설 비용이 훨씬 저렴하고 1기당 자금조달이 용이할 뿐만 아니라 입지 및 활용도 측면에서 더 유연하기 때문에 새로운 비즈니스 모델을 제시함. 따라서 이제 훨씬 더 광범위한 지역과 최종 사용자가 이러한 새로운 첨단 원자력 기술을 통해 원자력을 이용할 수 있게 되었음

세계원자력협회에 따르면 2024년 2월 현재 전 세계에서 약 58기의 원자로가 건설 중이며, 100기 이상의 원자로가 다양한 수준의 프로젝트 진척 상황 및 계획 단계(즉, 개발업체가 승인을 받았거나 자금 조달을 약속한 상태)에 있음. 미국 상무부는 2017년부터 10년간 전 세계 신규 원전 건설 시장 규모가 5,000억~7,400억 달러에 이를 것으로 추정함.[17] 또한 국제에너지기구(IEA)의 2050년 탄소 배출 넷제로 시나리오(NZE)에 따르면, 원자력 발전 부문에 대한 글로벌 투자 규모는 2010년대 연간 300억 달러 수준에서 2030년 1,000억 달러 이상으로 증가하고 2050년까지 연간 800억 달러 이상을 유지할 것으로 전망됨.[18] 유엔유럽경제위원회(United Nations Economic Commission for Europe, UNECE)의 경우, '탄소중립 혁신 시나리오(Carbon Neutrality Innovation Scenario)'에서 북미·유럽·유라시아 지역에 2050년까지 설치된 원자력 발전 설비용량이 874GW(이 가운데 420GW는 SMR)에 이르고 합성연료 기술 및 산업 공정 등 발전 이외의 기타 에너지 서비스에 원자력 발전이 활용될 것으로 내다봤음[19]

17) US Department of Commerce, 2017 Top Markets Report: Civil Nuclear – A Market Assessment Tool for U.S. Exporters, 2017
18) IEA, Nuclear Power and Secure Energy Transitions: From today's challenges to tomorrow's clean energy systems, 2022
19) United Nations Economic Commission for Europe, Carbon Neutrality in the UNECE Region: Technology Interplay under the Carbon Neutrality Concept, 2022

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 전 세계 원전 건설 현황·계획 및 투자 전망 (~2040)

출처: World Nuclear Association, IAEA PRIS

신규 원전 건설은 대부분 급속한 경제 성장과 그에 따른 에너지 수요 증가를 겪고 있는 비OECD 국가들이 주도하고 있음. 중국, 러시아, 인도 등 3개국이 2040년까지 가동될 것으로 예상되는 GW급 원자로의 거의 2/3를 차지함. 그러나 미국, 캐나다, 영국, 프랑스 등 다른 여러 국가에서도 잠재적인 신규 건설 프로젝트가 다수 진행 중이므로 기술과 공급업체의 다양성이 확대될 것으로 전망됨. 세계원자력협회는 2040년까지 신규 원자로를 건설하는 데 필요한 자본 지출 규모가 약 1조 8,000억 달러에 달할 것으로 추산함. 2020년대 초반부터 2030년까지 신규 원전 건설에 소요되는 자본 지출 규모는 약 5,000억~8,000억 달러에 달할 것으로 전망함. 2030년 이후는 보다 불확실하나, 2030년대에 추가로 4,500억~9,000억 달러의 자본이 투자될 것으로 추정함. 이는 GW급 원전 및 SMR 프로젝트 등 일부 계획 중인 원전 도입 프로젝트의 실현 여부에 따라 달라질 수 있음

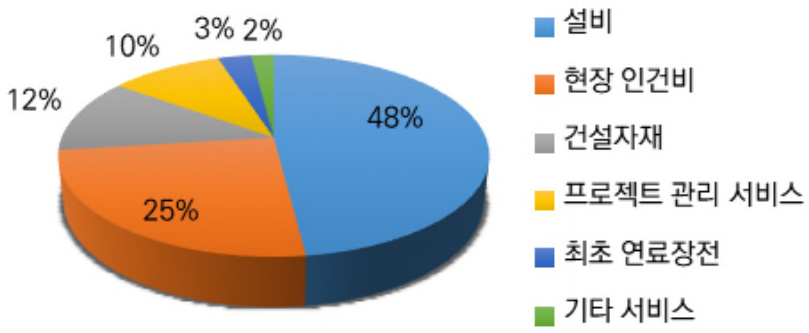
신규 원전 건설 비용

신규 원전에는 막대한 초기 자본 투자가 필요함. 원전에 따라서는 자본비(capital cost)가 신규 원전 에너지 비용의 80% 이상을 차지할 수 있으며, 나머지 비용은 일반적으로 운전 및 정비(O&M) 비용(15%)과 연료비(5%)로 구성됨. 이 비율은 이자율, 실제 건설 기간(이자 지급액에 영향), 계약된 엔지니어링 서비스의 성격에 따라 원전마다 다소 차이가 있을 수 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

자본비는 △순건설비용(overnight cost): 건설 기간, 인플레이션, 이자 비용 등을 고려하지 않은 장비, 건설 자재, 인건비 등 원전 건설에 소요되는 비용 △이자 비용: 원전 건설을 위해 조달한 자금(대출·부채 또는 주식 등)에 대한 이자 비용으로, 원전 건설 기간과 자본의 이자율에 따라 달라지는 비용 등 두 가지로 구분됨. 신규 원전의 순건설비용 추정치는 기술, 설비용량, 모듈식 여부, 반복성, 시장 환경에 따라 달라짐

[그래프] 대형(GW급) 원전 순건설비용의 일반적인 구성비



출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

세계원자력협회에 따르면, 현재 진행 중인 전 세계 신규 원전 건설 프로젝트의 가치는 약 3,000억 달러에 달함. 이 가운데 연간 100억 달러 이상이 상품과 서비스에 대한 국제 조달로 이루어짐. 세계원자력협회는 2040년 신규 원전 건설 프로젝트의 자본 지출 중 8,000억 달러 이상이 장비 구매와 주요 엔지니어링 서비스로 구성될 것으로 추산함. 나머지는 설계, 토목, 프로젝트 관리, 건설, 금융 및 규제 비용으로 구성됨. 상품과 서비스는 일반적으로 현지 공급업체와 해외 공급업체의 경쟁 입찰을 통해 조달됨. 원자로 공급업체의 일반 공급망에서 핵증기공급계통(NSSS)을 공급받을 수 있으며, 기타 장비와 건설 및 설치 서비스는 현지에서 조달할 수 있음. 따라서 국제 입찰에 개방될 시장의 규모를 추정하기는 어려움

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

2. 소형모듈원자로

소형모듈원자로(SMR)는 기존 원자로보다 크기가 작고 출력이 낮은 원자로로, 일반적으로 높은 수준의 피동 안전 기능을 갖추고 있음. SMR은 석탄 발전소 대체, 중공업 전력 공급, 격오지 에너지 공급 등 저탄소 전력 및 열 수요에 대한 상당한 시장 기회를 창출할 것으로 기대됨. SMR은 일반적으로 약 300MWe 이하의 용량을 가지며, 주로 공장에서 대량 생산이 가능하고, 건설 시간이 짧으며, 설치 비용이 절감되는 등 탁월한 경제성이 있음. 시스템이 더 콤팩트하기 때문에 공장에서 설비 현장으로 조립 및 운송하는 것이 일반적으로 더 간단하며, 여러 SMR 설계 또는 하위 계통을 표준 ISO 운송 컨테이너로 운송하는 것이 가능함. 또한 대부분의 경우 방사선비상계획구역(emergency planning zone, EPZ)은 반경 300미터를 넘지 않도록 설계됨

SMR 설계

2022년 IAEA가 발간한 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」(이하 SMR Book) 기준으로 현재 18개국에서 83종의 SMR이 개발되고 있음.[20] 그러나 개발 수준이 아직 초기 단계이거나 기타 상업적 측면으로 인해 SMR Book에 포함되지 않은 다른 많은 SMR 설계 업체가 존재함. 기술 개발 및 공급망 준비 수준은 매우 다양하며, 아직 진정한 계열화 효과의 경제가 실현되는 NOAK(Nth-of-a-kind) 기준으로 완전한 상용화에 도달한 기업은 아직 없음. 현재 중국, 러시아, 미국, 캐나다, 영국, 프랑스 등 여러 국가에서 SMR 개발을 지원하고 있음

[표] SMR 및 공급망 개발을 위한 정부 지원 사례

구분	내용
캐나다	• 2022년 뉴브런즈윅주 Ready4SMR 프로그램 개발을 위해 캐나다원자력산업기구(OCNI)에 자금 지원 – 지역 기업의 원자력 산업 진출 지원 • 2023년 SMR 활성화 프로그램(Enabling Small Modular Reactors Program) 발표 – SMR 제조 공급망 개발 자금을 포함하여 4년간 CAD 2,960만 자금 지원
영국	• 2014년 원자력 첨단제조 연구센터(Nuclear AMRC), Fit For Nuclear (F4N) 프로그램 발표 – 제조 자문 서비스(MAS)와 함께 150만 파운드의 보조금을 투자하여 제조업체의 민간 원자력 부문 진출 또는 확장을 지원하기 위해 마련한 프로그램 • 2020년 녹색산업혁명을 위한 10대 계획(Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution) 발표 – 차세대 원자력 기술 투자를 위한 최대 3억 8,500만 파운드의 첨단 원자력 기금 조성 내용 포함 • Rolls-Royce 주도 컨소시엄에 SMR 개념설계 개발 자금 지원 – 2021년 6월 1,800만 파운드 지원한 1단계 완료, 2단계 2억 1,000만 파운드 정부 보조금 지원
미국	• 2015년 원자력 혁신 가속화 게이트웨이(GAIN) 출범 – 새로운 원자로 기술 또는 첨단 원자로 기술 상용화에 필요한 기술, 규제, 재정 지원 제공 목표 • 2020년 미국 에너지부(DOE), 원자력 에너지국 내에서 '차세대 원자로 실증 프로그램(ARDP)' 개시 – Terrapower社의 Natrium, X-energy社의 Xe-100에 각각 8,000만 달러의 초기 자금 지원 – 10~14년 내 가동 목표 첨단 원자로 기술 개발 기업 5개社*에 각각 3,000만 달러 자금 지원 *Kairos Power, Westinghouse, BWXT Advanced Technologies, Holtec, Southern Company

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

20) IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

현재 운전 중인 SMR 노형으로는 러시아의 KLT-40S와 중국의 HTR-PM이 있음. 또한 육상 및 해상 배치용으로 개발된 러시아의 RITM-200은 현재 운영 중이거나 건조 중인 LK-60 쇄빙선에 사용되고 있음. 현재 건설 중인 SMR은 Carem25(아르헨티나), BREST-OD-300(러시아), ACP100/Linglong One(중국) 등임. 또한 많은 SMR은 열병합발전용으로 설계되어 산업용 열을 공급할 수 있음. 공정 열 공급을 위한 SMR 도입이 확대됨에 따라, 이러한 산업 공정에 SMR을 결합하기 위한 열교환기, 덕트, 밸브, 제어 및 모니터링 계측용 장비에 대한 추가적인 공급망 시장의 성장이 촉진될 전망임

국제 SMR 공급망의 활성화

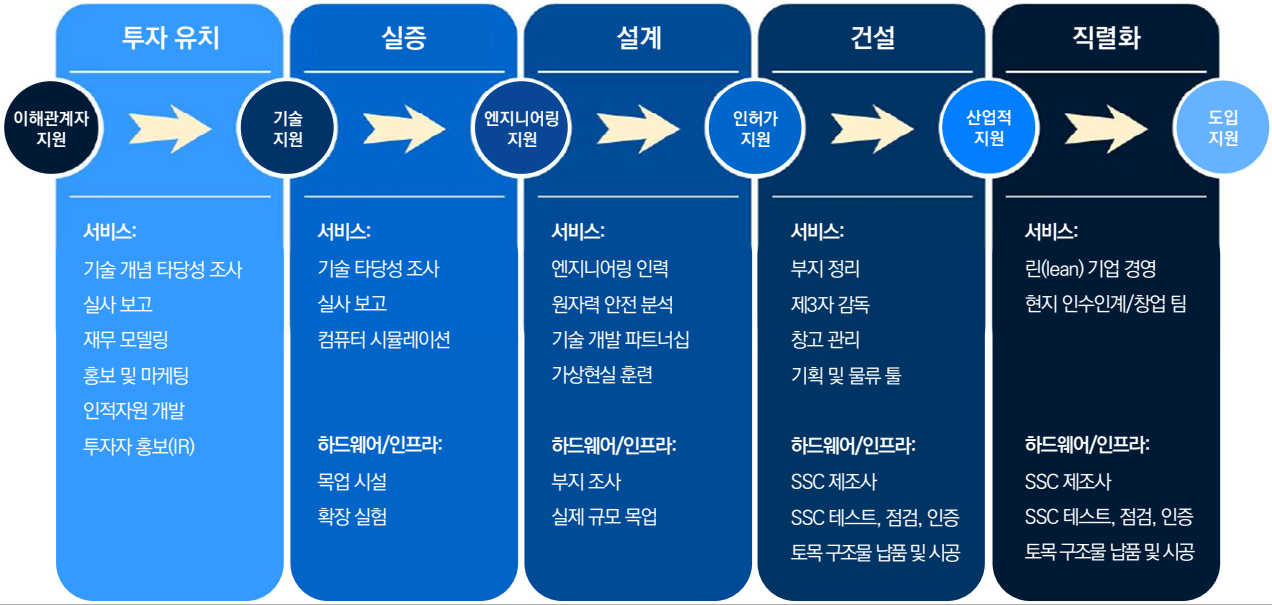
공급망에서 높은 수준의 제품 신뢰성을 확보하려면 탄력적인 비즈니스 및 조달 전략이 필요함. 원전 산업은 경쟁을 통해 비용과 위험을 최소화하는 거래 조달 모델만으로는 운영되지 않음. 성공적인 원전 건설을 위해서는 조달에 대한 협력적 접근 방식이 필수적이며, 조달 부서는 프로젝트 개발자의 리스크 경감 계획에서 핵심적인 역할을 담당함. SMR 공급망의 경우 몇 가지 추가적인 특성이 있으며, 이는 △연속적으로 제조되는 표준화된 장비의 사용 증가 △맞춤형 품목보다 상용화된 산업 품목의 사용 증가 △장비 상태 모니터링을 지원하기 위한 높은 수준의 디지털화 △운영사의 의사 결정을 지원하는 자율적 자체 조정 장비 및/또는 향상된 데이터 활용 △반복성, 품질 향상, 지속 가능한 재료 사용을 촉진하는 제조 기술 △중앙 집중식 SMR 모듈 및 시스템 제조 시설 △SMR 현장 조립 및 시운전을 지원하는 재사용 가능한 인프라 등으로 요약됨. 기존 원자력 공급업체들은 SMR 상용화를 지원하기 위해 다양한 서비스를 제공하고 있으며, SMR 적용에 관심이 있는 많은 국가에서 타당성 조사가 수행되고 있음

투자 유치, SMR 설계의 타당성 및 건설 가능성 입증 등을 지원하는 공급망 서비스는 이미 확립되어 있음. 2030년까지 SMR 시장 수요가 증가하면 이 분야에 필요한 구조물·계통·기기(Structure, System, Component, SSC)와 서비스를 공급하는 더 많은 국제 공급업체에게 시장 신호를 제공할 수 있을 것으로 전망됨. 초기 사례로는 NuScale Power社가 CFPP(Carbon Free Power Project)의 VOYGR[21] 원자로 압력용기(Reactor pressure vessel, RPV) 단조를 위해 두산에너빌리티로부터 제조 및 서비스 조달 계약을 체결한 사례, TerraPower社가 Natrium 실증 발전소의 설계, 인허가, 조달, 시공 협력사로 Bechtel과 계약한 사례 등을 꼽을 수 있음

21) NuScale Power社의 SMR 브랜드

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] SMR 프로젝트 추진 과정의 공급망 서비스 및 하드웨어 조달 분야 예시



출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

국제 SMR 공급망의 발전

SMR 공급망은 공급업체 국가뿐만 아니라 엔지니어링, 운전 및 정비(O&M), 연료 서비스를 제공하기 위해 SMR이 건설 및 운전되는 국가에서도 필요함. 또한 계통, 부품, 엔지니어링 서비스에 대한 안정적이고 지속적인 수요도 필요하며 이를 달성하기 위해서는 정부 및 업계 차원의 여러 가지 이니셔티브와 조치가 요구됨. 각국 정부가 지원하는 구조화된 민관 파트너십과 국제협력이 일부 지역에서는 핵심적인 원동력이 될 수 있음. 미국의 원자력 혁신 가속화 게이트웨이(GAIN) 프로그램, 캐나다의 SMR 로드맵, 중국·프랑스·영국 등의 SMR 개발에 대한 국가적 투자 약속 등이 그 사례임. 정부는 원자력 부문에 대한 장기적인 약속 외에도 제조업체, 서비스 공급업체 및 기타 공급망 이해관계자에게 우호적인 비즈니스 환경을 조성함으로써 SMR 공급망을 지원할 수 있음

산업계의 경우, 대부분의 프로젝트가 자본 및 운영 비용을 추정하기에는 너무 초기 단계에 있기 때문에 SMR 도입 및 운전을 위한 비즈니스 환경과 관련하여 불확실성이 큼. 주로 공장(또는 현장에서 환경적으로 제어되는 구조물) 내에서 원자로를 제작하는 모듈식 건설을 통해 비용을 절감할 수 있음. 공장 제작은 표준화로 인해 더 빠르고, 더 높은 품질을 보장하기 쉬우며, 더 저렴하다는 장점이 있음. 또한 현장에서 모듈형 원자로를 직렬로 설치할 수 있어 원전의 전체 용량을 확장하고 조정할 수 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

또한 SMR은 대형 재래식 원자로와 같은 규모의 경제는 부족하지만 공장에서 대량 생산을 통해 비용을 절감할 수 있음. 상업용 또는 산업용 부품도 이러한 제품의 사용 확대와 품질 수용성 덕분에 SMR 공급망에서 중요한 역할을 할 것으로 예상됨. 원자력 안전에 중요한 품목의 경우 구매자(또는 최종 사용자)가 상용 등급 제품 또는 해당 공급업체에 대한 추가 품질 검사를 수행함. 상용 등급 제품은 이미 대규모 원전에서 사용되고 있으며 수십 년 동안 성공적으로 조달되어 왔음. 또 다른 비용 절감 방안도 있는데, 예를 들어 특히 부유식 원전에 사용되는 SMR의 경우 조선 역량을 SMR 제조에 활용할 수 있음. 또 최종 사용자 현장에서 나중에 조립할 수 있도록 맞춤형 SMR 제조 공장 또는 허브를 설립하는 것도 비용 절감에 도움이 될 전망임

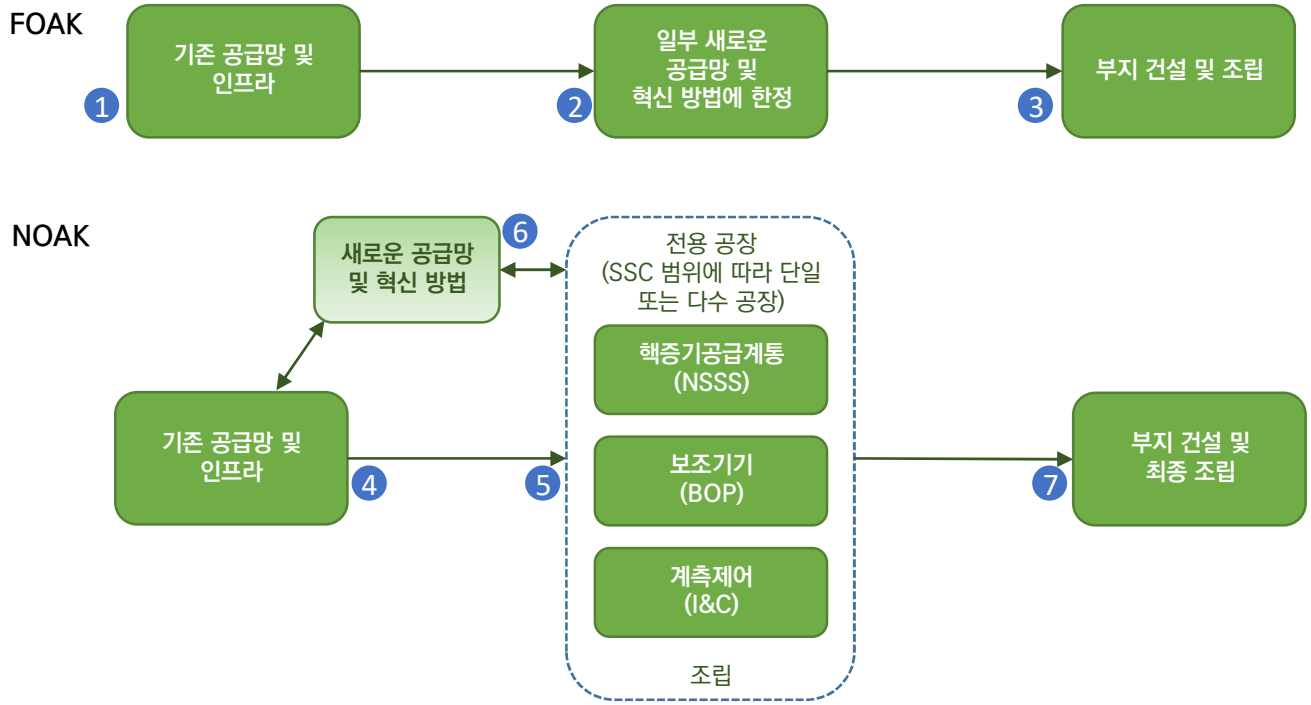
FOAK(초도호기)에서 NOAK(동종 차기원전)로 이어지는 SMR 공급망

SMR 공급망의 발전을 위한 중요한 전략적 선택 중 하나는 기존 공급망 장비와 새로운 품목의 균형임. 많은 경우(주로 경수로의 경우) FOAK(First-of-a-kind, 초도호기) SMR의 공급망은 대부분 기존 관행을 기반으로 함. 이는 많은 FOAK 원자로 공급업체가 상업화된 제품의 대규모 양산 및 납품보다는 주로 원자로 설계 및 운전 비즈니스 사례를 입증하는 것에 우선적인 목표를 두고 있기 때문임. 많은 SMR 제조업체가 직면한 과제는 대량 생산 및 조립(원격 및 현장)의 단계적 변화를 제공할 수 있는 새로운 SMR 공장과 인프라를 어떻게 구축할 것인가 하는 것임. FOAK 원전에 필요한 공급망은 NOAK(Nth-of-a-kind, 동종 차기원전)에 필요한 공급망과 다를 것이며, 이는 새로운 도전 과제를 제시하는 동시에 제조 및 프로세스 혁신을 위한 몇 가지 기회도 제공할 것임

FOAK 원전을 대표하는 본격적인 프로토타입 원전은 크기와 성능을 포함하여 새로운 설계의 모든 기능을 갖추고 있어야 함. 이러한 프로토타입에는 원자로 노심, 핵증기공급계통(NSSS), 보조기기(balance-of-plant, BOP), 보조계통(ancillary system)이 포함될 수 있음. 프로토타입 원전에는 추가적인 안전 기능이 포함될 수 있으며, 세부적인 검사 및 샘플링을 용이하게 하기 위한 특수 설계 기능 및 프로그램적 조치가 필요할 수도 있음. 또한 테스트 기간 동안 필요한 추가 센서와 테스트 장비를 수용할 수 있음. 테스트가 성공적으로 완료되면 이 설계를 기반으로 한 후속 플랜트에서는 이러한 설계 기능 및 프로그램적 조치를 위한 품목은 포함할 필요가 없음. SMR 도입은 새로운 공급망, 제조, 건설 방법론을 통합하는 것을 목표로 함. 이러한 기술 중 일부는 개발 중이며 FOAK 도입 시나리오에서 구현할 준비가 아직 되지 않았음. 따라서 SMR 도입과 관련된 공급망 전략은 FOAK에서 NOAK 단계로 진행됨에 따라 진화할 가능성이 높음. 예를 들어, 전체 노심 생산, 연료 공급 등은 초기에는 보다 전통적인 공급망에 의존할 수 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] FOAK 및 NOAK SMR 공급망 시나리오



FOAK 시나리오	FOAK SMR 공급망 전략의 일반화된 프로세스 흐름 ① 기존 공급망 활용 ② 전략에 일부 혁신이 도입되나 기존 프로세스도 활용 ③ 주로 기존 관행에 따라 현장 시공
NOAK 시나리오	NOAK의 일반화된 프로세스 흐름 (더 많은 SMR 공급망 인프라와 혁신 통합) ④ 기존 공급망 인프라와 일부 새로운 공급망 인프라 및 기업이 혼합 ⑤ 원전의 다양한 영역에 대한 전용 모듈 공장. 보조기기(BOP) 및 기타 특정 영역의 조립을 위한 별도의 시설 ⑥ FOAK에 비해 새로운 공급망 방식과 혁신. 더 많은 첨단 제조 기술 도입 ⑦ FOAK에 비해 새로운 현장 시공/조립 방식

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

SMR 공급망 인프라

SMR은 다른 발전 설비와 많은 유사점이 있음. 원자로 노심을 제외한 대부분의 보조 구조물·계통·기기(SSC)는 다른 산업 발전 시설에서 사용되는 것과 유사함. 따라서 발전, 석유화학, 운송 등 여러 부문에 서비스를 제공하는 공급망이 SMR 구축을 지원할 수 있음. 대형 재래식 원전에 비해 단일 SMR에 사용되는 SSC의 수는 적지만, SMR을 대규모로 배치하려면 해당 SSC의 대량 생산이 필요함. 소수의 고유 부품을 대량 생산할 경우, 적은 주문 수량 및 불확실한 예측으로 인한 부품의 노후화 문제를 완화할 수 있게 됨. 또한 SMR의 전체 단위 크기가 작아지면 더 많은 공급업체가 개별 SSC를 놓고 경쟁할 수 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

예를 들어, 현재 대형 원전의 원자로 압력용기(Reactor pressure vessel, RPV) 또는 기타 주요 구성품의 단조 제조 역량을 갖춘 업체는 극소수에 불과함. SMR의 경우 크기가 작고 모듈화되어 있기 때문에 주요 부품을 납품할 수 있는 공급업체가 더 많아야 함. 그러나 일부 SMR 설계는 RPV 치수가 대형 원자로 설계와 비슷한 경우도 있지만, 일부는 여러 부분을 함께 용접하는 RPV 제조 방식이 통합되어 있음. SMR에서 RPV는 가장 오랜 제조 기간이 소요되고 중요한 품목이므로, 해당 부품의 단조 및 가공과 관련된 인프라는 공급망에서 병목 현상이 발생할 가능성이 높음. 또한 일부 설계는 일체형 SMR로, RPV의 단조 및 기계 가공에 있어 보다 향상된 역량이 요구됨

[표] 일부 SMR 원자로 압력용기의 일반적인 설계 특성 개요

모델	직경(m)	길이(m)	기본 소재	무게(t)	1기당 출력(MWe)	부지당 RPV 수 (예상)	부지당 전력 출력(MWe)
GE Hitachi BWRX-300 (미국/일본)	4	26	SA508	485	290	1	290
NUWARD (프랑스)	4	13	카본스틸	310	170	2	680
NuScale Power Module (미국)	3	18	-	260	77	6	462
UK SMR (영국)	4.5	11	SA508M Class 1, Grade 3	220	440	1	440
KLT-40S (러시아)	2	4	Steel 15Cr2Ni-Mo VA-A	70	35	2	70
IMSR-400 (캐나다)	3.5	7	SS316 또는 Alloy N	170	180	2	390

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

글로벌 SMR 시장의 창출을 위한 권고사항

글로벌 SMR 시장의 창출과 이것이 공급망에 가져올 기회는 다양한 측면, 글로벌 요인, 이해관계자에 따라 달라질 것임. SMR 시장의 활성화를 위해 특히 집중해야 할 분야에 대한 권고사항을 국제협력, 산업적 차원, 정치적 차원으로 구분하여 제시하고자 함

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 글로벌 SMR 시장의 창출을 위한 부문별 주력 분야

구분	내용
국제협력	• 원전 프로젝트의 비용 효율적인 납품을 지원하기 위한 국제적 차원의 공급업체 간 협력 이니셔티브 – 다양한 SMR 공급업체, 개발업체, 국가(SMR 수출국 및 도입국 모두) • 공급망 수요, 역량, 용량에 대한 계획 • SMR 설계 검토 및 승인에 대한 다국가적 접근 방식을 달성하기 위한 조치 – 여러 국가에서 SMR 도입을 가속화할 수 있도록 지식 공유 등 부분적인 조치도 권장
산업적 차원	• 공급망 내에서 기술 중립적인 공통 기회를 창출하기 위한 SMR 공급업체와 주요 파트너 간의 협업 • 기존 및 잠재적 공급업체가 국제 SMR 공급망 시장의 기대와 니즈를 이해할 수 있는 기회 조성 • 단기적인 핵심 지원 기술의 통합(예: 디지털화, 첨단 제조, 모듈형 구조 등) • 특정 범위의 연계 생산을 위한 구성 요소 표준화 • 공급망을 통합하고 장기적인 수요 신호를 제공하기 위한 공급 다변화 • 잠재적 공급업체가 다른 지역의 조달 접근 방식과 SMR 시장을 이해할 수 있도록 조달 모델의 용이성, 견고성, 수용성과 관련된 문제 해결 • SMR 공급 및 도입과 관련된 위험 분담의 최적화 – 공급업체에 불균형적인 위험과 책임이 부과될 경우 공급망 계약의 비용, 시간, 품질에 영향
정치적 차원	• 광범위한 SMR 도입에 필요한 공급망 인프라에 대한 투자 조달을 위해 정부와 민간 부문의 국내 및 국제적인 협력 강화 • 한 규제기관에서 수행한 인허가 활동을 다른 규제기관에서 수용할 수 있도록 원자력 규제 요건의 조화에 대한 지원 • 민간 투자자에 대한 정부 지원(예: 전력구매계약 및 세액공제)을 통해 FOAK SMR의 리스크 분담 • 비(非)전력 응용 분야를 포함한 SMR 실증 프로젝트를 지원하는 정부 보조금 및 정책

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

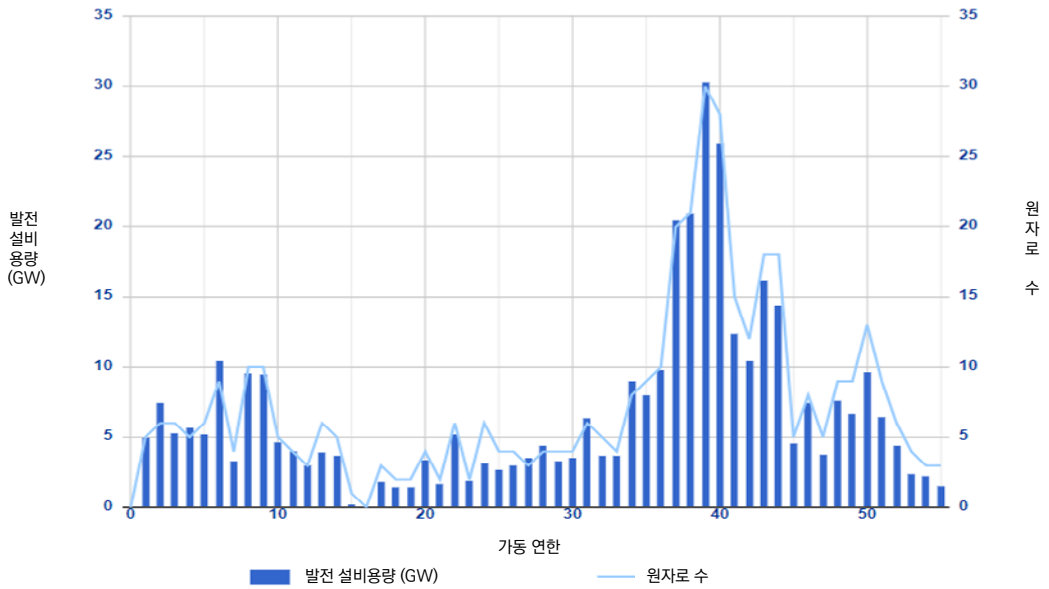
copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

3. 계속운전

원자로의 원래 설계수명 기간이 만료된 이후 운전허가 기간을 연장하여 운전하는 계속운전(Long-term operation, LTO)이 성공적으로 입증되는 사례가 늘고 있음. 원자로는 높은 초기 자본 비용과 낮은 연료 비용이 특징이며, 운전 및 정비(O&M) 비용은 운영사의 효율성과 규제 관행에 따라 달라짐. 잘 관리되고 O&M 비용이 낮은 원전의 경우 매우 경쟁력 있는 발전 단가를 확보할 수 있음. 계속운전은 신규 원전 건설로 이어지는 징검다리 역할을 하여 핵심 산업 역량을 보존하는 데 도움이 됨. 또한, 계속운전에 대비한 개보수 및 현대화 프로젝트는 지속 가능한 비즈니스에 필요한 공급업체 계약과 향후 신규 건설 비용을 절감할 수 있는 프로젝트 경험을 제공함

그러나 일부 원자로는 설계수명 동안 운전된다는 보장이 없으며, 경우에 따라 운전 비용이 너무 높거나 기술, 인허가, 정치적 문제 또는 시장 관련 문제가 발생할 수 있음. 운전 비용이 경쟁력 있는 경우에도 원자로를 계속 가동하기 위해 대규모 추가 자본 지출이 필요한 경우(예: 증기 발생기 교체), 기존 비용에 추가 자본에 대한 서비스 비용이 더해져 원전 가동의 경제성이 떨어져 소유기업이 폐로를 결정할 수도 있음. 이를 보완하기 위해 최근 일부 국가에서는 원전의 계속운전을 지원하는 정책을 도입하고 있어, 원자로의 노후화를 관리하고 수명을 최적화하기 위한 조치를 취하는 것이 원전 산업에서 성장하는 분야가 되고 있음. 원자로의 설계수명 전반에 걸쳐 적용될 수 있는 일반적인 수명 관리 방안은 출력 상향 조정임. 전 세계적으로 많은 운영기업이 이를 통해 상당한 신규 발전 설비용량을 추가했음. 미국 내에서만 1970년대 후반부터 수행된 업그레이드를 통해 8GWe 이상의 용량이 추가됨[22)]

[표] 글로벌 원전 노후화 분포



출처: IAEA PRIS

22) US NRC, Approved Applications for Power Uprates, 2023.10.20.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

전 세계 계속운전 현황

한국수력원자력이 발표한 「세계원전 가동 계속운전 영구정지 및 해체현황」 자료에 따르면, 2023년 6월 30일 기준 전 세계 32개국에서 가동 중인 410여 기의 원자로 중 약 57%인 233기가 계속운전 승인을 받았음. 또한, 범위를 최초운전허가기간이 끝난 노후 원전으로 좁힐 경우, 허가 만료 원자로 252기 가운데 92%에 달하는 원자로가 계속운전으로 수명을 연장했음

[표] 주요국 원전 계속운전 현황

단위: 기

국가	가동 원자로	계속운전 승인 전	계속운전 승인 중	승인 합계	가동 30년 이상	가동 40년 초과
미국	93	32	52	84	90	54
프랑스	56	11	21	32	52	23
중국	55	0	1	1	1	0
러시아	37	1	23	24	24	13
한국	25	0	0	0	7	1
캐나다	19	1	18	19	19	8
인도	19	0	9	9	5	1
우크라이나	15	0	12	12	12	3
일본	10	2	4	6	8	1
영국	9	5	4	9	8	1
스페인	7	0	7	7	7	1
체코	6	2	4	6	4	0
스웨덴	6	0	0	0	6	4
파키스탄	6	0	0	0	0	0
벨기에	5	2	3	5	5	3
핀란드	5	0	4	4	4	4
슬로바키아	5	0	0	0	2	0
스위스	4	1	3	4	4	3
헝가리	4	0	4	4	4	1
아르헨티나	3	0	2	2	2	2

출처: 한국수력원자력

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

계속운전을 위해 완료해야 하는 인허가 요건은 국가마다 크게 다름. 예를 들어, 미국의 경우 원전의 최초 운전허가 기한은 40년임. 원전 운영사는 20년 인허가 갱신을 신청할 수 있으며, 이후에도 갱신을 이어갈 수 있음. 이를 통해 일부 원전은 최대 80년 동안 원자로를 운전할 수 있게 됨. 다른 주요 원전 운영 국가와 기업들도 80년 이상 원자로를 운전할 수 있는 방안을 연구하겠다는 의사를 밝힘. 스웨덴과 프랑스 등 일부 국가에서는 10년간의 최초 운전허가를 부여하며, 원자력 안전당국이 안전하다고 판단하는 한 계속운전이 가능함. 이러한 국가에서는 규제기관이 10년마다 정기적인 안전성 검토를 실시하고 그 결과에 따라 운영사에 안전성 향상 조치를 요구할 수 있음

모든 원자로 기술이 60년 동안 운전할 수 있는 것은 아님. 예를 들어, 영국의 개량형가스냉각로(Aadvanced Gas-cooled Reactors, AGR)는 교체할 수 없는 흑연 부품의 수명 제한으로 인해 평균 설계수명이 40~50년으로 2020년대 내에 폐로될 예정임. 러시아의 RBMK도 흑연 감속재 수명으로 인해 원자로의 성능이 저하되고 운전 수명이 약 45년으로 제한될 것으로 예상됨. 그러나 이러한 설계는 전 세계 원전 중 극히 일부에 불과함. 2022년 말 기준 가동 가능 상태인 422기의 원자로 중 대부분은 이러한 제약이 없는 가압경수로(72%), 비등경수로(12%), 가압중수로(11%) 설계임. IEA는 20년 계속운전에 필요한 자본지출을 kW당 평균 $450~$950으로 추산하며 계속운전이 매우 비용 경쟁력 있는 발전 방법이라고 밝힌 바 있음[23)]

러시아-우크라이나 전쟁으로 인해 2022년 세계 가스 가격이 사상 최고 수준에 도달한 가운데, 원전 계속운전은 유럽에서 더욱 주목받고 있음. 여러 유럽 국가는 에너지 위기로 인해 원전의 계속운전을 고려하고 있음. 예를 들어 벨기에의 경우 2025년까지 모든 원전을 영구정지할 계획이었으나 이를 10년 연기하여 2035년까지 Doel 4호기 및 Tihange 3호기의 계속운전을 결정함. 유럽원자력산업협회(FORATOM)는 원자력이 2050년까지 EU의 에너지 믹스에서 중요한 역할을 할 것으로 보고 2050년까지 원전 계속운전 투자액이 약 450억~500억 유로에 달할 것으로 추산함[24)]

전 세계적으로 계속운전이 가능한 원자로는 2040년까지 최소 140개에 달할 것으로 추정됨.[25)] 이를 위한 개보수 작업의 총 규모는 약 500억~1,000억 달러에 달할 수 있음. 또한 계속운전을 위한 원자로 개보수에는 2040년까지 연평균 약 30억~40억 달러 규모의 국제 조달이 필요할 것으로 예상됨

23) IEA, Projected Costs of Generating Electricity, 2020.
24) NUCNET, Foratom / 'Long-Term Operation Of Reactor Fleet To Help EU Meet Climate Goals At Affordable Cost', 2019.07.10
25) World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

계속운전을 위한 개보수 작업

현재 운전 중인 대부분의 원자로는 설계수명이 약 30~40년이며, 그 이후에는 일반적으로 수명을 연장하기 위한 개보수 작업이 필요함. 계속운전은 가장 경제적인 발전 형태 중 하나이지만, 규제 또는 정치적 요인으로 인해 항상 가능한 것은 아님. 2022년 말 현재 폐로된 원자로 207기 중 150기 이상이 운전 기간이 40년이 되지 않음

[표] 폐로된 원자로의 운전 연한 (2022년 말 기준)

폐로 시 연한	원자로 수 (기)	총 발전 설비용량 (GWe)
40년 미만	151	76.4
40년	55	28.8
50년	1	0.9
합계	207	106.0

출처: IAEA PRIS

원전의 구조물·계통·기기(SSC)는 대부분 교체할 수 있으며, 계속운전을 위한 개보수에는 이러한 교체 작업이 포함됨. 원전 운영사는 계속운전 개보수 평가의 일환으로 교체 및 대체할 부품과 설비를 결정함. 이러한 계속운전 개보수 평가 활동에는 다음 표와 같은 항목이 포함됨

[표] 계속운전 개보수 평가 항목

항목	내용
원자로 압력용기(RPV) 검사	• RPV는 무결성 보장을 위해 정기적인 검사가 필요하며 계속운전 목적으로 원전을 개조할 시 RPV에 손상 징후가 있는지 검사
증기 발생기 교체	• 증기 발생기는 일반적으로 약 30~40년 작동 후 교체 필요
전기 시스템 업그레이드	• 노후 원전의 전기 시스템은 최신 안전 표준을 충족하지 못하거나 현행 전력 부하를 처리하지 못할 수 있으므로 보수 공사 중에 업그레이드가 필요할 수 있음
안전 시스템 업그레이드	• 노후 원전의 안전 시스템도 최신 규제 요건을 충족하지 못하거나 현재의 안전 위험을 처리하지 못할 수 있으므로 업그레이드가 필요할 수 있음

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

이러한 검사 및 유지보수에 필요한 장비는 △원자로 압력용기 내부나 증기 발생기 등 접근하기 어려운 구역을 검사할 때 사용하는 원격조작차량(Remotely operated vehicles, ROV) △정비 활동 중에 작업자를 방사선 노출로부터 보호하는 납 또는 콘크리트 등의 방사선 차폐재 △절단 또는 용접 장비와 같은 전문 도구 등이 있음. 개보수 작업의 최종 범위는 원전마다 다르며 설계 특성, 운전 경험 및 이력, 이전의 개보수 작업 등에 따라 결정됨

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 일반적인 계속운전 개보수 작업 범위

항목	내용
기계 장비	• 원자로 용기 헤드, 증기 발생기, 터빈, 펌프, 모터, 밸브
유체 시스템	• 부식 방지 재료로 배관 교체, 독립적인 노심 냉각 시스템, 대형 구경 배관, 고밀도 폴리에틸렌으로 매립 배관 교체
전기 장비	• 교류 발전기, 변압기, 고전압 포스트, 전기 보드
계측·제어(I&C) 장비	• 제어실, 케이블, 센서
토목공사	• 냉각탑
후쿠시마 사고 이후 안전 조치	• 필터 통풍구, 비상 디젤 발전기, 추가적인 최종 냉각 시스템
기타	• 화재 방지 등

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

계속운전을 위한 개보수 작업을 통해 수행되는 일반적인 개선 조치에는 전기 출력 향상, 계측·제어(I&C) 장비 업그레이드, 운전 유연성 개선, 플랜트 현대화 등이 있음. 운전 유연성 개선과 플랜트 현대화는 재생에너지와 같은 가변적인 에너지원 보급률이 높아짐에 따라 전력망 제약이 증가하는 가운데 특히 전력 사업자들이 고려하는 항목임. 또한 공급망 노후화로 인해 일부 사업자는 시설의 I&C 시스템을 교체하고 있음. 그러나 계속운전의 과제 중 하나는 설비 부품과 시스템을 기존과 유사한 것으로 교체해야 한다는 점임. 기존에 설치된 부품은 기존 장비 제조업체에서 더 이상 제조하거나 지원하지 않을 수 있음. 원자력 산업 표준은 다른 산업에서 사용되는 상용 기성품의 사용을 금지하는 경우가 많고, 심층방어(defence-in-depth)의 일환으로 다양하고 중복적인 시스템을 유지해야 하므로 구형 시스템을 예비 목적 또는 최신 시스템의 대안으로 계속 사용해야 할 수도 있음. 이에 따라 발전소 현대화가 지연되고 노후화된 품목을 조달하는 데 드는 비용과 어려움이 과도하게 발생할 수 있음

미국 환경보호청(EPA)이 의뢰한 보고서[26]에 따르면 원전 개보수 비용은 규모, 수명, 설계, 위치 등 여러 요인에 따라 달라짐. 그러나 대부분의 가압경수로(PWR) 및 비등경수로(BWR) 보수 프로젝트에 공통적으로 필요한 몇 가지 주요 투자 및 장비가 있음. 계속운전을 위한 원전 개보수에는 장비 및 인력 전문성 모두에 있어 상당한 투자가 필요하며, 이는 공급망에 여러 가지 기회를 제공함

26) Eastern Research Group, Nuclear Power Plant Life Extension Cost Development Methodology, 2018.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 계속운전에 필요한 장비 교체/개보수 활동

장비 교체/개보수	작업 예상 시점의 원전 가동 연한	비고
주 터빈 교체	40년	
열 교환기 교체	45년	
급수 배관 교체	50년	
주 발전기, 로터(현장), 여자기(exciter), 전압 조정기의 교체 또는 개보수	50년	
급수 히터 교체	40년 및 60년	
방사선 모니터링 업그레이드	45년	
디지털 제어 시스템 업그레이드	45년	
가압기 교체	50년	PWR만 해당
콘덴서 튜브 교체	50년	
대형 케이블(4160V) 교체	60년	
추가 저장용기 및 베이스	60년	
외부 사용후핵연료 저장소 설치용 패드	60년	
증기 발생기 교체	60년	PWR만 해당
메인 콘덴서 교체	60년	
원자로 냉각수 펌프 보수	60년	
가압기용 히터 및 관련 제어장치 교체	60년	PWR만 해당
비상 디젤 발전기 및 지원 장비/시스템 교체	60년	
화재 방지 시스템 업그레이드	60년	

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

계속운전 관련 글로벌 트렌드

전력 공급 부족과 기후변화 대응 노력으로 인해 조기 폐로 예정이었던 원자로의 운전허가 기한을 연장하려는 노력이 전 세계적으로 진행되고 있음

[표] 주요국 계속운전 동향

국가	내용
아르헨티나	• Nucleoelectrica Argentina, Atucha 1호기 계속운전 및 사용후핵연료 건식 저장시설 건설 프로젝트에 9,300만 달러 조달
벨기에	• Electrabel, 정부와 Doel 4호기 및 Tihange 3호기 운전허가 기한 2036년까지 10년 연장 합의
브라질	• Angra 원전의 원자로 2기, 2044년까지로 20년 운전허가 기한 연장 추진

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

캐나다	• Bruce Power 원전, 3-8호기 운전허가 기한 2064년까지 연장 추진 – 증기 발생기, 압력 튜브, 칼란드리아관(calandria tube), 공급관(feeder tube) 등 주요 부품 교체 계획 – 2020~2033년에 걸친 개보수 작업을 통해 각 원자로의 운전 수명이 약 30~35년 연장 • Darlington 원전 개보수 프로젝트는 128억C$ 규모로 공급망 현지화 비율 약 95%
핀란드	• Loviisa 1호기 및 2호기 계속운전 공사에 10억 유로 이상 투자
프랑스	• EDF의 가동 원자로 56기 중 32기를 차지하는 900MWe 원자로 일부는 2024년 말까지 개보수 작업을 완료하여 운전 수명 10년 연장 목표
일본	• 2023년 초 일본 정부는 60년 이상 원자로 운전 허용 법안 승인 • 2021년 일본 원자력규제청(NRA)은 원자로 4기에 대한 20년 계속운전 승인 – 미하마 3호기, 다카하마 1호기 및 2호기, 도카이 2호기 – 센다이 1호기 및 2호기 등도 계속운전 허가 신청
루마니아	• Nuclearelectrica, Cernavoda 1호기를 2026년 말까지 운전한 후 2027~2029년 기간 18억 5,000만 달러의 비용을 들여 개보수할 계획이며 이후 약 2060년까지 운전할 예정
영국	• EDF Energy, 2024년 3월부터 2026년 초까지 1185MWe Hartlepool 원전과 1155MWe Heysham I 2기 원자로의 계속운전에 들어갈 계획 • 현재 운전 중인 원전 중 유일하게 2030년 이후 계속운전에 들어갈 것으로 예상되는 Sizewell B PWR은 현재 운전 정지 예정일인 2035년보다 20년 더 연장될 예정
러시아	• 일부 원자로의 경우 설계수명 45년에서 60년으로 계속운전 추진 중
미국	• 상업운전 중인 원자로 92기 중 거의 절반이 40년 이상 가동 중이며 30년 미만은 3기에 불과 – 약 80%의 원자로가 최초 운전허가 기간 40년에서 20년 연장 • 인플레이션 감축법(IRA)의 기존 원전 세액공제 지원으로 일부 발전소의 계속운전 촉진 전망 • 에너지부(DOE)의 60억 달러 규모 '민간 원전 융자 프로그램(Civil Nuclear Credit Program)'은 원전의 조기 폐로 방지

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

4. 해체 및 폐기물 관리

원전의 해체는 해당 부지를 모든 규제 감시로부터 해제하고 그린필드(greenfield, 무제한적 활용이 가능한 용지로 일반적으로 공원이나 녹지 조성) 또는 브라운필드(brownfield, 발전소 및 연구소 등 제한된 용도로 활용할 수 있는 용지) 상태를 달성하는 데 필요한 다양한 정화 활동을 포함함. 해체 작업에 구체적으로 어떤 활동이 포함되는지에 대한 보편적인 정의는 없음. 예를 들어, 프랑스의 경우 원전 해체는 해체 및 현장 폐기물 관리 활동을 포함하지만 폐기물 처리는 제외하는 반면, 미국에서는 현장 내외부의 폐기물 관리가 해체 활동에 포함됨. 따라서 여러 국가의 해체 및 폐기물 관리 활동을 평가하고 비교할 경우에는 원전 해체의 범위를 명확하게 정의해야 함

또한 원전 해체의 책임 소재와 규모도 다양함. 예를 들어 프랑스에서는 EDF가 원자로 해체를 담당하는 유일한 발전 사업자이지만, 독일의 경우 해체의 책임이 여러 사업자에게 분산되어 있음. 따라서 일부 사업자는 동일하거나 유사한 원자로를 여러 개 폐로하는 연쇄 효과를 통해 다른 사업자보다 더 큰 이익을 얻을 수 있음. EU집행위는 여러 국가의 다양한 원전 해체 비용 추정치를 분석한 결과, 2030년대 말 원전 해체 시장 규모가 연 22억 유로에 달할 것으로 전망함

대규모 원전의 해체는 일반적으로 상당한 기간과 예산이 필요한 복잡한 작업임. IAEA에 따르면 관련 폐기물 관리 비용을 포함한 원전 해체 비용은 일반적으로 5억~20억 달러에 이르며, 가스냉각 흑연감속로는 크기와 복잡성으로 인해 가압경수로(PWR)나 비등경수로(BWR)에 비해 훨씬 더 많은 비용이 소요됨.[27] 원전 해체 과정은 일반적으로 약 15~20년이 걸리지만, 상황에 따라 달라질 수 있음. 사용후핵연료 재처리 시설과 같은 대형 연료주기 시설의 해체 비용은 일반적으로 약 40억 달러이며, 이러한 시설의 해체는 완료하는 데 30년 이상이 소요될 수 있음. 열출력이 10MW인 연구용 원자로의 경우 크기, 목적, 운전 기간에 따라 다르지만 해체하는 데 2,000만 달러 이상의 비용이 들며 5~10년이 소요됨

IAEA는 2050년까지 약 200기의 원자로가 해체 작업에 착수할 것으로 예상하며 원전 해체 시장의 호황을 전망함.[28] 원전은 건설 전에 해체 계획을 수립해야 하므로 신규 원전을 설계할 때에도 해체 전문 지식이 필요함. 현재 전 세계적으로 50기 이상의 원자로가 건설 중이라는 점을 감안할 때, 원전 해체 산업은 장기적으로 전망이 밝음

27) IAEA, Nuclear Decommissioning: Addressing the Past and Ensuring the Future, 2023.04.
28) IAEA, Nuclear Decommissioning Market Set to Boom, 2023.04.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

원전 해체 프로젝트

1970년대와 1980년대에 상업운전을 시작한 많은 원자로의 수명이 다함에 따라 2030년대에는 원전 해체가 중요한 산업 활동이 될 것으로 전망됨. 2030년대에는 전 세계 원전 해체 시장의 규모가 연간 60억~100억 달러 사이가 될 것으로 예상됨

[표] 영구정지된 원자로의 지역적 분포

지역	원자로 수 (기)	발전 설비용량 (GWe)
북미	47	22.1
동아시아	32	20.5
중동 및 남아시아	1	0.1
중동부 유럽	25	12.8
서유럽	99	43.5
합계	204	99

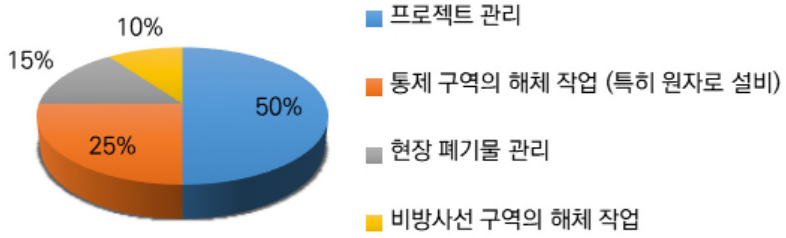
출처: IAEA PRIS

2022년 말 기준 전 세계 운전 가능한 원자로의 평균 연한은 30년이 넘었으며, 원자로의 약 2/3가 30년에 도달함. 설계수명이 60년이라고 해도 2050년까지 약 300기의 원자로가 폐로된다는 것을 의미함. 영구정지된 원자로 204기 가운데 약 60%는 유럽에, 23%는 미국에, 13%는 일본에 위치해 있음. 원전 외에도 현재 100기 이상의 핵연료주기 시설과 연구용 원자로가 폐로를 기다리고 있음. 일부 핵연료주기 시설과 연구용 원자로의 폐로는 원전에서 발생하는 폐로 폐기물과 달리 명확한 처리 경로 없이 복잡한 방사성 폐기물이 발생할 수 있어 매우 까다로울 수 있음. 이러한 복잡성으로 인해 발전소 이외의 원자력 시설 해체는 비용 초과와 일정 지연의 위험이 더 높음. 예를 들어, 영국 셀라필드(Sellafield) 원자력 발전소의 해체 프로그램만 해도 원자력해체청(NDA)의 해체 예산의 2/3를 차지할 정도임. EU집행위의 연구[29]에서는 미국, 스웨덴, 스위스, 슬로바키아, 프랑스를 포함한 여러 국가의 다양한 해체 비용 추정치를 비교함

29) European Commission, Study on the market for decommissioning nuclear facilities in the European Union, 2018.11.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 일반적인 원전 해체 프로젝트 비용 구성

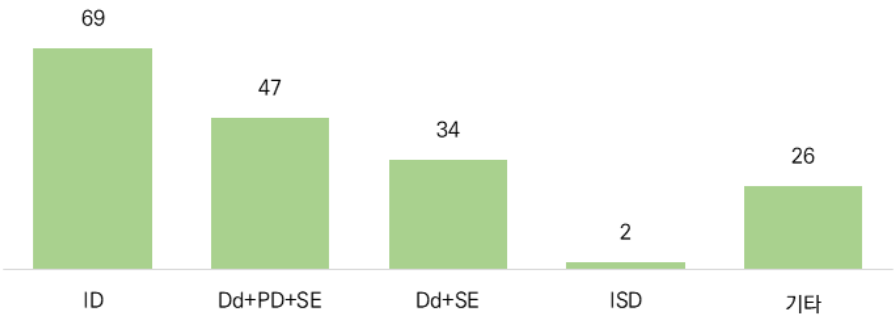


출처: European Commission

원전 해체 전략

대형 원전의 경우 대규모 제염 및 콘크리트 구조물 철거 작업이 포함될 수 있는 반면, 방사성 동위원소 실험실의 경우 약간의 청소와 정화 작업만 필요할 수도 있음. 특정 시설에서 적절한 해체 전략을 선택할 때는 다양한 일반적 요소와 현장별 요소를 고려해야 함. 이러한 요소에는 비용, 보건 및 안전 문제, 환경 영향, 자원 가용성, 이해관계자 참여 등이 포함됨. 경우에 따라서는 핵심 자원이 부족하여 일부 폐기 전략이 제거될 수도 있음. 일부 국가에서는 자금 부족이나 폐기물 관리 인프라 부족과 같은 제약 요인이 발생할 수도 있음

[표] 주요 원전 해체 전략과 해당 원자로 수



전략(약어)	설명
즉시 해체(Immediate Dismantling, ID)	• 모든 방사성 물질의 즉각적인 해체 및 제거로 보통 20년 내외 소요
지연 해체(Differed Dismantling, Dd)	• 원자로에서 사용후핵연료를 제거하고 방사성물질을 포함하는 설비 일부 또는 전부를 일정기간 동안 안전하게 저장하거나 유지(safe storage)한 후 해체를 진행하는 방식으로 60년 내외 소요
부분 해체(Partial Dismantling, PD)	• 부분적인 해체
밀폐 저장 후 해체(Safe Enclosure, SE)	• 일정기간 장기 보관하여 방사선 준위가 떨어지기를 기다렸다가 해체
현장 처분 (In situ disposal, ISD)	• 방사성 물질의 밀봉차폐 및 그에 따른 접근 제한까지 포함

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

프로젝트 관리

일반적으로 전체 원전 해체 비용의 절반을 차지하는 프로젝트 관리에는 모든 엔지니어링 및 관리 활동과 함께 해체 작업을 안전하게 이행하는 한편, 규제 준수에 필요한 현장 감시, 보안 및 유지 관리가 포함됨. 프로젝트 관리 비용은 주로 시간과 큰 상관 관계가 있으므로 프로젝트의 계획된 일정이 지연될 경우 비용이 크게 증가할 수 있음. 인허가 보유 기업(현장 소유주)은 일반적으로 원전 운전기간 동안 구축된 현지 공급망을 활용하려는 경우가 많음. 특히 유럽의 1차 계약업체는 일반적으로 필요한 자체 엔지니어링 및 프로젝트 관리 역량을 개발할 수 있을 만큼 경험이 풍부함. 그러나 경우에 따라서는 엔지니어링, 조달, 품질 관리, 계획 및 인허가 지원을 하청업체에 의존하기도 함

원전 해체 작업

원전 해체 비용의 나머지 절반을 차지하는 것은 해체 및 폐기물 관리 작업을 포함한 현장 해체 활동임. 이러한 활동은 일반적으로 프로젝트 관리 기업에서 조달하며, 주로 세 가지 범주의 기업이 참여함. ① 통제 구역에서 작업하고 제염 및 원자로 내부 해체와 같은 중요한 작업을 수행하는 고도로 전문화된 기업 ② 방사성 물질을 다룰 수 있는 능력을 갖춘 숙련된 현지 및 국제 기업 ③ 발전소의 시스템 및 구성 요소를 유지·보수하거나 보조 건물 및 냉각탑과 같은 비방사선 구역을 철거하는 비원자력 토목 또는 산업 분야 기업 등임

[표] 주요 원전 해체 활동 및 기업

해체 활동	비용	경쟁 수준	주요 기업
프로젝트 관리, 엔지니어링 및 지원 서비스	높음	낮음~중간	• 원전 인허가 보유 기업: EDF, Iberdrola, OPG, Rosatom, Exelon, CEA, Orano, Sogin, NDA, Javys, Engie, E.ON, Kepco, Tepco • 엔지니어링 서비스 기업: Assystem, Jacobs. 여러 컨설팅 기업.
통제 구역, 특히 원자로 장비의 해체 작업	비교적 높음	낮음	• Orano, Westinghouse, GE Hitachi
현장 폐기물 관리	중간	높음	• Orano, Cavendish Nuclear, NUKEM Technologies, Holtec International, Fluor International, ONET Technologies, GNS, Bilfinger, DMT Group
비방사선 구역의 일반 해체 작업	낮음	매우 높음	• 원자력 분야 외의 토목 엔지니어링을 주로 하는 많은 현지 기업

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

폐기물 관리 및 처분

원전의 운전기간 동안에는 사용후핵연료를 포함하여 방사성 물질이 생성되며, 이를 처리, 저장, 최종 폐기해야 함. 방사성 폐기물은 고유한 물리화학적 및 방사선학적 특성을 가지고 있기 때문에 방사성 폐기물 및 사용후핵연료 처리에 있어 안전하고 기술적, 경제적으로 가능한 접근법을 개발하기 위해서는 다양한 요건이 필요함

방사성 폐기물은 주로 방사능 수준에 따라 저준위(LLW), 중준위(ILW), 고준위(HLW)로 분류됨. 핵연료주기의 모든 단계에서 방사성 폐기물이 발생하는데, 폐기물로 지정된 사용후핵연료와 이를 재처리하여 발생하는 고준위 방사성 폐기물 외에도 원전의 운전 및 해체 과정에서도 방사성 폐기물이 발생함. 또한 원전 도입 프로그램이 있는 국가와 없는 국가 모두 의학, 농업, 연구, 제조, 광물 탐사 등 비전력 활동과 관련된 방사성 폐기물을 보유할 수 있음. 많은 해체 작업은 노동 집약적이고 시간이 많이 소요되며, 무거운 차폐막과 부피가 큰 보호복이 필요함. 따라서 원전 해체와 관련된 공급망 내 혁신은 해체 모델링 및 계획을 위한 디지털 도구나 비용·안전성을 향상시킬 수 있는 정교한 장비 및 로봇 공학에 집중될 가능성이 높음

방사성 폐기물과 사용후핵연료의 분류 방식에는 국가별로 차이가 존재하는데, 여기에는 두 가지 주요 이유가 있음. 첫째, 각국의 폐기물 허용 기준(Waste Acceptance Criteria, WAC)은 특정 처분장 및 처분 방식에 대한 안전성 평가와 연계되어 있어 시설 설계 및 부지 특성이 기준에 영향을 미침. 예를 들어 핀란드(Onkola)와 프랑스(Cigéo)의 심지층처분장 두 곳의 암반 특성은 서로 다름. 둘째, WAC에 의해 생성된 경계는 기술적 고려 사항 외에도 기술정치적(technopolitical) 조건에 따라 달라질 수 있음. 이러한 측면은 국제적으로 일관된 WAC의 채택을 어렵게 함

방사성 폐기물의 처리 문제는 본질적으로 기술적이면서도 정치적인 문제임. 장기적인 해결책을 개발하고 실행하기 위해서는 공공의 지원이 필요함. 또한 해체 작업과 관련된 물류 및 비용 문제를 극복하기 위해서는 새롭고 혁신적인 프로세스와 기술이 요구됨. 이와 더불어 원전의 비용 효율적인 해체 및 복구 작업을 지원하기 위해 국제적인 차원에서 공급업체 간 협력 프레임워크가 구축될 필요가 있음

[표] 심지층처분장 부지가 확정된 국가

처분장	단계	예상 가동 시기	예상 비용(십억 유로)	담당 기관(기업)
핀란드 Onkalo	완공 임박	2024	3.5	Posiva社
스웨덴 Forsmark	건설 허가 신청 검토	2030~2032	2.39	SKB社
프랑스 Cigéo	건설 허가 신청 검토	2035	25~30	방사성폐기물관리청 (ANDRA)

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

Ⅲ. 원자로 공급업체 및 공급망

1. 원전 소유기업 및 개발기업
2. 주요 원자로 공급업체
3. NSSS 구성요소 및 시스템 업체

1. 원전 소유기업 및 개발기업

원전 공급망은 원자력 등급 및/또는 안전 기밀 품목의 공급업체 및 서비스 제공업체로 간주되기도 함. 그러나 원전 프로젝트에 필요한 대량의 인프라와 비원자력 등급 장비로 인해 이보다 더 광범위한 공급망을 고려할 수 있음. 원전 산업이 소수의 기술 선도국 및 공급국에서 오늘날 32개국[30]으로 확대됨에 따라 원전 공급망은 지난 수십 년 동안 그랬던 것처럼 2040년까지 계속 진화할 것으로 예상됨

원전 건설 및 조달을 위한 경쟁적인 글로벌 시장이 존재하지만, 과거에는 과중한 단조 용량과 같은 병목지점(choke points)이 존재할 수 있다는 우려가 제기되어 왔음. 기술 이전과 제조의 현지화(특히 아시아)는 현재 알려진 계획에 따라 주요 원자로 부품을 제작할 수 있는 충분한 공급업체가 있다는 것을 의미함. 그러나 신규 주문 부족과 적은 물량으로 인해 일부 공급업체는 사실상 시장을 떠났음. 이러한 공급업체들은 전망이 개선되면 확장할 수 있는 내부 역량을 일부 보유하고 있는 경우가 많지만, 필요한 역량과 인증을 획득하기 위해 투자가 필요할 수 있음

경쟁 압력은 제조의 현지화, 합작 투자, 국제 조달을 촉진하고 있음. 그 결과, 제조는 여러 국가에 걸쳐 이루어질 수 있으며, 최종 조립 및 설치 전에 자재, 반제품 및 완제품이 하나 이상의 국경을 넘나들게 됨. 또한 하청을 통해, 또는 다국적 기업의 전문 사업부가 참여함으로써 여러 국가에서 서비스가 제공될 수도 있음. 그러나 기술 수출에 대한 엄격한 규제 통제나 새로운 원전 프로그램의 착수 실패로 원자력 에너지가 감소하는 시나리오에서는 세계화 추세가 위축될 수 있음

최근 몇 년 동안 전 세계 공급망은 지정학적 긴장, 에너지 안보 우려, 코로나19 팬데믹으로 인해 어려움을 겪고 있음. 이로 인해 일부 원자력 사업자와 프로젝트 개발자는 지역 또는 지역 공급망에 대한 전략적 옵션을 늘리는 데 집중하고 있음. 부품의 구형화 및 노후화 문제를 해결하기 위해서도 조달이 필요함. 이제 원전 공급망은 운영 조직의 확장된 일부이며 감독이 필요하다는 인식이 널리 퍼져 있음

30) 아르헨티나, 아르메니아, 벨기에, 벨라루스, 브라질, 불가리아, 캐나다, 중국(본토 및 대만), 체코, 핀란드, 프랑스, 독일, 헝가리, 인도, 이란, 일본, 멕시코, 네덜란드, 파키스탄, 루마니아, 러시아, 슬로바키아, 슬로베니아, 남아공, 한국, 스페인, 스웨덴, 스위스, 영국, 우크라이나, UAE, 미국

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

대부분의 경우 원전은 지역 또는 국가 전체에 에너지 서비스를 제공하는 유틸리티가 소유하고 있음. 아래 표에서 볼 수 있듯이 이러한 유틸리티는 대부분 민간기업임. 나머지 원전 소유주는 국영기업임. 국영 전력회사는 주로 국영기업 또는 지자체 소유기업으로, 원전을 운영하고 국가 전력망과 전력 유통업체에 전력을 판매하기 위해 설립된 경우가 많음. 지자체 소유기업은 원전을 운영하지 않으며 독립적인 민간 원전도 소수에 불과함. 그러나 2030년대에 소형모듈원자로(SMR) 시장이 발전함에 따라 이러한 역학 관계는 변화할 가능성이 높음

[표] 주요 원전 소유기업

<table>
<tr><th>전력 생산자</th><th colspan="2">유틸리티</th></tr>
<tr><th>국영기업</th><th>국영기업</th><th>민간기업</th></tr>
<tr><td>• Armenian NPP (아르메니아)
• CGN (중국)
• CNNC (중국)
• Datang Company (중국)
• Energoatom (우크라이나)
• Huaneng (중국)
• Nuclearelectrica (루마니아)
• Nucleoelectrica Argentina (아르헨티나)
• Nuclear Power Corporation of India Ltd (인도)
• Nuclear Power Production & Development Company of Iran (이란)
• Pakistan Atomic Energy Commission (파키스탄)
• Rosenergoatom (러시아)
• SPIC (중국)</td><td rowspan="3">• Axpo (스위스)
• BKW Energie (스위스)
• Bulgaria Energy Holding (불가리아)
• CEZ (체코)
• CFE (멕시코)
• DELTA Energie (네덜란드)
• EDF (프랑스)
• EDF Energy (영국)
• Eletronuclear (브라질)
• Electrobras (브라질)
• ENEC (UAE)
• Energie NB Power (캐나다)
• Energy Northwest (미국)
• Eskom (남아공)
• Fortum (핀란드)
• KEPCO (한국)
• MVM (헝가리)
• Nebraska Public Power District (미국)
• Ontario Power Generation (캐나다)
• Taipower (대만)
• TEPCO (일본)
• TVA (미국)
• Vattenfall (스웨덴)</td><td rowspan="3">• AFP (미국)
• Alpiq (스위스)
• Ameren Corp. (미국)
• ANAV (스페인)
• Arizona Public Service (미국)
• Bruce Power (캐나다)
• CHUDEN (일본)
• Constellation Energy (미국)
• Dominion Energy (미국)
• DTE Energy (미국)
• Duke Energy (미국)
• EnBW (독일)
• Endesa (스페인)
• ENEL (이탈리아)
• Energia (일본)
• Engie (프랑스)
• Electrabel (벨기에)
• Entergy Corp. (미국)
• E.ON (독일)
• EPH (체코)
• Slovenske Elektrame (슬로바키아)
• FirstEnergy Corp. (미국)
• HEPCO (일본)
• Iberdrola (스페인)
• JAPC (일본)
• KCP&L (미국)
• KEPCO (일본)
• 규슈전력 (일본)
• NestEra Energy (미국)
• NRG Energy (미국)
• PG&E (미국)
• PSEG (미국)
• RIKUDEN (일본)
• RWE (독일)
• Southern Company (미국)
• 도호쿠전력 (일본)
• Uniper (독일)
• Sydkraft (스웨덴)
• Vistra (미국)
• Luminant (미국)
• Xcel Energy (미국)
• YONDEN (일본)</td></tr>
<tr><td>민간기업</td></tr>
<tr><td>• Talen Energy (미국)
• TVO (핀란드)</td></tr>
</table>

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

규제가 완화된 에너지 시장에서 신규 원전에 대한 투자는 일반적으로 어떤 형태로든 정부의 지원을 받는 유틸리티와 국영기업들에 의해서만 이루어졌음. 민간 부문이 신규 원전 프로젝트에 투자할 수 있는 전환점으로 작용할 잠재 요인은 SMR에 대한 파이낸싱 확대와 더불어 지속 가능하고 환경·사회·거버넌스(ESG)를 준수하는 투자처를 찾는 투자자들의 참여가 늘어날 것으로 예상되는 부분임. 2020년 이후 SMR을 개발하기 위해 시장에 진입하려는 신규 개발자의 수가 증가했음. 상위 10대 원전 소유기업은 전 세계 원자력 발전 설비용량의 거의 60%에 해당하는 총 234GWe의 원자로 265기를 보유하고 있음

[표] 상위 10개 원전 소유기업 (2022)

기업	원자로 수	2020년 이후 변동	발전 설비용량(GW)
EDF (프랑스)	56	-	61.4
- EDF Energy (영국)	9	-6 (3GW)	5.9
Rosenergoatom (러시아)	37	-1 (740MW)	27.7
CGN (중국)	26	+2 (1.3GW)	26.8
한국수력원자력 (한국)	25	+1 (1.2GW)	24.4
CNNC (중국)	25	+3 (4GW)	22.8
NPCIL (인도)	22	-	6.8
Constellation Energy (미국)	21	-	21.5
Ontario Power Generation (캐나다)	18	-	13
Energoatom (우크라이나)	15	-	13.1
Duke Energy (미국)	11	+1 (1GW)	10.8
합계	265		234

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

프랑스 EDF는 가장 많은 원전을 소유하고 있음. 2022년 프랑스 정부는 100% 지분을 확보하여 EDF를 국유화하겠다고 밝혔으며, 당시 소유하지 않았던 나머지 16%의 지분에 대한 인수 입찰을 신청함. EDF는 유럽에서 가장 큰 전력 공급업체로 여러 국가에 자회사를 두고 있음. Rosenergoatom은 러시아 국영기업인 Rosatom의 자회사로 러시아의 원전을 운영하고 있음. 중국 CGN은 EDF 및 Framatome과 협력하여 CPR-1000 가압경수로 노형을 개발함. 주요 원자로 장비 공급업체와 함께 개발한 고급 버전은 CNNC 설계와 통합되어 'Hualong One' 원자로로 발전함. CGN과 그 계열사는 홍콩과 심천에 전력을 공급하는 다야만(Daya Bay) 발전소를 비롯해 여러 지역에서 발전소를 운영하고 있음. 중국 CNNC는 중국 내 원자력 에너지 및 연료, 연구, 설계 및 국제 분야를 아우르는 100개 이상의 자회사를 보유하고 있음. Hualong One(HPR1000) 원자로는 CNNC와 CGN이 합작하여 개발함. CNNC는 CGN 지분도 보유하고 있음

인도원자력공사(NPCIL)는 인도에서 원자력 발전소의 설계, 건설, 시운전, 운영, 유지보수를 담당하는 국영기업임. 1962년 제정된 인도 원자력법은 원자력 에너지에 대한 민간 부문의 통제를 금지하고 있음. 현재 NPCIL은 투자 자금을 국가 계획에 의존하고 있으며 지분 소유권과 지배구조가 분리되어 있지 않음. Constellation Energy는 미국 최대 규모의 원전을 소유하고 있음. 동사는 Exelon Corporation이 2022년에 유틸리티 사업과 다른 사업을 분리하면서 설립되었음. 캐나다 Ontario Power Generation(OPG)은 온타리오 주정부의 에너지 시장 규제 완화 및 민영화 정책의 일환으로 1999년 Ontario Hydro가 해체될 때 Crown corporation이 발전 자산을 인수하면서 탄생한 기업임. OPG는 Pickering 및 Darlington 발전소 등 원자로 10기를 소유 및 운영하고 있으며, Bruce Power에 임대하여 운영하는 8기도 소유하고 있음

Energoatom은 우크라이나의 국영 원자력 발전회사로 1996년에 설립되었음. 우크라이나 전력 부문은 부분적으로 규제가 완화되고 민영화되었음. Duke Energy는 2012년 Progress Energy와의 합병을 통해 보유한 원전을 확장함. 현재 노스캐롤라이나와 사우스캐롤라이나에 있는 6개 발전소에서 11기의 원자로를 소유하고 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

2. 주요 원자로 공급업체

현재 20개 이상의 국가에서 원전 건설 및 주요 계속운전(LTO) 개보수 프로그램이 진행 중이며, 더 많은 국가에서 원자력 발전소용 장비와 서비스를 공급하고 있음. 사회 경제적 이익을 위해 현지 조달을 극대화하려는 정부의 열의와 국제 조달이 균형을 이루면서, 많은 합작 투자를 포함하여 국제적으로 다양한 공급망 비즈니스 환경이 형성됨

지난 20년 동안 원자로 공급업체의 수는 안정적으로 유지되었지만 유럽과 북미에서 신규 수주가 감소하면서 시장 점유율에 변화가 생겼고, 중국에서 원전 건설이 활발해지며 CNNC와 CGN이 수행하는 프로젝트의 비중이 높아짐. 2010년부터 2020년대 초반까지 CGN(28%), Rosatom(25%), CNNC(15%) 등 세 기업이 신규 원전 건설의 2/3 이상을 차지함. Rosatom은 이 기간 동안 다른 어떤 회사보다 많은 원전을 수출함. 2021년 기준으로 전 세계에서 운영 중인 439기의 원전 중 38기가 러시아에 있으며 42기는 러시아 기술을 수출하여 건설됨. 또한 러시아 기술이 적용된 원자로 15기가 건설 중인 것으로 파악됨[31)]

원자로 공급업체

대부분의 경우 핵증기공급계통(NSSS) 공급업체는 공급업체의 작업 패키지에 대한 요구 사항의 흐름을 포함하여 프로젝트 납품에 있어 가장 큰 범위의 공급 및 관리를 제공함. 핵연료주기의 대부분에 걸쳐 기술과 서비스를 제공하는 종합적인 GW급 원자로 공급업체는 최소 12개이며, 새로운 SMR 공급업체를 고려하면 이 수는 크게 늘어남. 주요 GW급 공급업체는 △SNC-Lavalin △China National Nuclear Corporation (CNNC) △China General Nuclear Power Group (CGN) △ Framatome △GE Hitachi △ 한국전력공사(KEPCO) △Mitsubishi Heavy Industries (MHI) △ Nuclear Power Corporation of India Ltd (NPCIL) △Rosatom △State Power Investment Corporation (SPIC) △Toshiba △Westinghouse Electric Company 등임. 또한, 2022년 IAEA가 발간한 「Advances in Small Modular Reactor Technology Developments」에 따르면 60~65개 민간기업에서 83종의 SMR이 개발되고 있음[32)]

일반적으로 원자로 공급업체의 Tier1 및 Tier2 공급업체로서 지원을 제공하는 국제적인 원자력 엔지니어링 역량을 갖춘 주요 기업으로는 △Aecom △Ansaldo Nucleare △Assystem △Atomenergomash △Babcock International △Bechtel △BWX Technologies △두산에너빌리티 △Fluor △GE Power △현대중공업 △Jacobs △Larsen & Toubro △OMZ △Rolls-Royce △Shanghai Electric △Skoda JS 등이 있음

31) World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.
32) IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2022.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 활동 중인 NSSS 공급업체 (ABC 순, 2022년)

단위: 기

공급업체 코드	기업명	건설 중	운전 중	합계
ABB ATOM	ABB ATOM	0	4	4
ACECOWEN	ACECOWEN (ACEC-Cockerill-Westinghouse)	0	4	4
ACLF	(ACECOWEN - Creusot Loire - Framatome)	0	1	1
AECL	Atomic Energy of Canada, Ltd	0	6	6
AECL/DAE	Atomic Energy of Canada Ltd And Department Of Atomic Energy	0	1	1
AECL/DHI	Atomic Energy of Canada Ltd./Doosan Heavy Industries & Construction	0	3	3
AEE	Atomenergoexport	0	8	8
AEM	Atomenergomash	9	37	46
ASEASTAL	Asea-Atom/Stal-Laval	0	2	2
ATOMMASH	Atommash AEM-Technologies	3	0	3
B&W	Babcock & Wilcox Co.	0	5	5
CE	Combustion Engineering Co.	0	10	10
CFHI	China First Heavy Industries	10	9	19
CIAE(Chi)	China Institute of Atomic Energy	1	0	1
CNEA	Comisión Nacional de Energía Atómica	1	0	1
CNNC	China National Nuclear Corporation	0	9	9
CZEC	China Zhongyuan Engineering Corporation	0	2	2
DEC	Dongfang Electric Corporation	1	13	14
DHICKAEC	Doosan Heavy Industries and Construction Co. Ltd./Korea Atomic Energy Research Institute/Combustion Engineering	0	2	2
DHICKOPC	Doosan Heavy Industries & Construction Co.Ltd./Korea Power Engineering Company/Combustion Engineering	3	13	16
FAEA	Federal Atomic Energy Agency	0	1	1
FRAM	Framatome	0	64	64
FRAMACEC	Framaceco (Framatome-ACEC-Cockerill)	0	1	1
GE	General Electric Co.	0	38	38
GETSCO	General Electric Technical Services Co.	0	1	1
H/G	Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd	1	0	1
HITACHI	Hitachi, Ltd	1	2	3
IZ	Izhorskiye Zavody	0	5	5
JSC ASE	JSC Atomstroyexport	10	2	12
KEPCO	Korea Electric Power Corporation	1	3	4
KWU	Kraftwerk Union, AG	1	6	7
MAEP	Minatomenergoprom, Ministry of Nuclear Power and Industry	0	2	2
MHI	Mitsubishi Heavy Industries, Ltd	0	11	11
NNC	National Nuclear Corporation	0	2	2
NPC	Nuclear Power Co, Ltd	0	6	6
NPCIL	Nuclear Power Corporation of India, Ltd	3	17	20
NPIC	Nuclear Power Institute of China	0	8	8
OH/AECL	Ontario Hydro/Atomic Energy of Canada, Ltd	0	18	18
ORANO	Orano/Framatome	3	3	6
PAA	Production Amalgamation 'Atommash', Volgodonsk	0	4	4
PAIP	Production Amalgamation Izhorsky Plant Atommash, Volgodonsk, Russia	0	11	11
PPC	PWR Power Projects, Ltd	0	1	1
Russian	Russian Hydraulic Press Design Institute (OKB)	1	0	1
S/KWU	Siemens/Kraftwerk Union, AG	0	1	1
Shanghai	Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd	1	0	1
SHE	Shanghai Electric	0	2	2
SIEMENS	Siemens AG, Power Generation	0	2	2
SKODA	Skoda Concern Nuclear Power Plants Works	2	10	12
SNERDI	Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co. Ltd	1	0	1
TOSHIBA	Toshiba Corporation	0	2	2
TSINGHUA	Tsinghua University	0	1	1
WH 또는 WEC	Westinghouse Electric Corporation	2	66	68
WH/MHI	Westinghouse Electric Corporation/Mitsubishi Heavy Industries, Ltd	0	3	3
기타		2	0	2
전 세계		57	422	479

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

위 표에 나열된 NSSS 공급업체 가운데 14곳은 건설 중이거나 운전 중인 원자로가 10기 이상 있음. 이들 업체는 건설 중인 원자로 중 40기(70%), 운전 중인 원자로 중 319기(76%)를 차지함. IAEA에 따르면, 영구정지, 운전 중 또는 건설 중인 원자로를 포함하여 91개의 개별 법인 또는 합작회사가 원전을 공급했음. 2022년 말 기준, 원전 설계를 담당한 55개 법인 또는 합작회사가 원자로를 하나 이상 운전 중이거나 건설 중으로, 원전 시장에서 활발히 활동하고 있음

[표] 주요 NSSS 공급업체 개요

업체	내용
Candu Energy	• 캐나다 엔지니어링 및 건설 기업 SNC-Lavalin의 자회사로, 2011년 국영기업인 Atomic Energy of Canada Ltd (AECL)의 원자로 부문을 인수함. Candu 원자로는 인도, 중국, 루마니아 등에 수출됨
China National Nuclear Corporation (CNNC)	• CNNC는 중국 내 원자력 및 연료 분야를 아우르는 100개 이상의 자회사를 보유한 국영 기업임. Hualong One(HPR1000) 원자로는 2015년에 설립된 CNNC와 CGN의 합작회사를 통해 개발되었으며, 내수 및 수출 시장을 목표로 하고 있음. CNNC는 CGN의 지분도 보유하고 있음
China General Nuclear Power Group (CGN)	• CGN은 EDF 및 Framatome과 협력하여 '개량형 중국형 가압경수로'인 CPR-1000을 건설하고 주요 원자로 장비 공급업체와 함께 고급 버전을 개발, CNNC 설계와 통합하여 Hualong One을 탄생시킴. CGN과 그 계열사는 홍콩과 선전에 전력을 공급하는 다야만 원전을 포함하여 20개 이상의 발전소를 운영하고 있음
Huaneng	• Shidaowan HTR-PM의 지분 47.5%를 소유하고 있으며 시아푸(Xiapu)에 HTR-PM600을 건설할 계획임. 또한 수출용 HTR 200의 공급을 추진하고 있음
Framatome	• Framatome(구 AREVA)은 프랑스 국영기업으로, EDF가 대주주임. AREVA는 EDF에 매각이 완료된 후 2018년에 Framatome으로 사명을 변경함. 미쓰비시중공업(MHI)과 Assystem도 소수 지분을 보유하고 있음
GE-Hitachi	• GE와 Hitachi는 2007년에 전략적 사업 제휴를 맺고 GE Hitachi Nuclear Energy(GEH)를 설립하여 최첨단 BWR을 공급하고 있음. GE는 1956년 미국 최초의 상업용 BWR인 Dresden 1호기를 시작으로 원전 납품에 풍부한 경험을 보유하고 있으며, BWR 기술에 특화된 회사로 SMR인 BWRX-300을 개발 중임
한국전력공사 (KEPCO)	• 1982년 설립된 국영기업으로 한국수력원자력(KHNP)을 비롯한 발전 자회사를 통해 한국의 전력 산업을 관리하고 있음
Mitsubishi Heavy Industries (MHI)	• MHI는 1970년대 Westinghouse로부터 라이선스를 받아 일본 최초의 가압경수로(PWR)를 건설한 이래 주요 원자력 기술 공급업체로 자리매김해 왔음. 2019년 MHI NS Engineering Company로 새롭게 출범했으며, MHI의 SRZ-1200은 기존 PWR에 비해 추가적인 안전 기능을 갖추고 있음
Nuclear Power Corporation of India Ltd (NPCIL)	• 원전의 설계, 건설, 시운전, 운전, 유지보수를 담당하는 인도 국영기업
Rosatom	• 러시아 국영기업으로, 원자로 수출 부문인 Atomstroyexport, 핵연료 및 동위원소 생산 기업인 Techsnabexport (Tenex) 등의 계열사를 거느리고 있음. 자회사인 Rosenergoatom을 통해 러시아 원전을 운영하고 쇄빙선 선단인 Atomflot을 운영하고 있음
State Power Investment Corporation (SPIC)	• SPIC는 여러 발전회사를 소유한 China Power Investment와 State Nuclear Power Technology Corporation (SNPTC)의 합병으로 설립되었음. SPIC의 연구 기관인 SNERDI는 CAP1400 원자로를 설계하고 SMR에 대한 연구를 수행하고 있으며, Landstar-I 열공급용 원자로(200MWt)의 개발사임
Toshiba	• Toshiba는 1970년대~2000년대에 19기의 대형 BWR을 건설함. 1980년대에는 모듈형 건설 기술을 통해 자본 비용을 절감하고 유지보수 효율성을 개선하기 위해 도쿄전력의 주도로 GE-Hitachi와 함께 ABWR 설계를 개발함
Westinghouse Electric Company (WEC)	• WEC의 현재 주요 시장용 GW급 원전은 현재 미국에서 건설 중인 AP1000으로, 중국에 도입되어 있으며 폴란드, 영국, 체코, 아프리카 국가 등 여러 국제 입찰에 참여하고 있음

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

원전 부문은 비교적 성숙한 산업이지만 다른 첨단 기술 분야만큼 국제 경쟁에 노출되어 있지 않음. 국제적으로 인정받는 원자로 모델이 시장에 많은 편은 아니나, 공급업체 통합 및 전문화 과정이 더 진행되면 2030년까지 약 4~6개의 대형 GW급 원자로 공급업체가 주요 기업으로 남을 수 있음. 원자력 엔지니어링 역량을 갖춘 다른 주요 기업으로는 다음과 같은 기업이 있음

[표] 주요 원자력 엔지니어링 기업

업체	내용
GE Power	• Alstom과 ABB(ASEA-Brown Boveri)의 합작회사인 ABB Alstom Power가 전신으로, 원자력 산업에 터빈, 터보 발전기, 열교환기, 펌프, 밸브, 제어·안전 시스템을 공급하는 세계 최대의 공급업체였으며 2015년 GE가 인수하여 GE Power로 재탄생함
Babcock International	• 영국의 항공우주·방위·원자력 엔지니어링 서비스 기업으로, 1960년대 영국의 민간 원자력 발전소 개발에 참여했으며 2009년 영국원자력청(UK Atomic Energy Authority) 산하 기업 UKAEA Ltd를 인수함
BWX Technologies	• 2015년 Babcock & Wilcox에서 분사한 미국 기업으로, 여러 원자력 관련 사업부를 포괄하고 있음. 원자력 부품, 원자로, 발전 장비 제조, 기술 및 관리 서비스에 종사하고 있음
두산에너빌리티	• 2001년 민영화 당시 국영기업이었던 한국중공업을 인수한 뒤 2006년 미쓰이로부터 영국 Babcock Energy를, 2009년 Skoda Power를 인수해 원자력 건설, 보일러 제작, 증기터빈 및 발전기 분야 역량을 갖추게 되었음
Jacobs Engineering Group	• 2017년 CH2M Hill을, 2020년 Wood Group을 인수하여 원자력 부문에서 역량을 확장함. 앞서 Wood Group은 2017년 원자력 역량을 갖춘 또 다른 오랜 엔지니어링 회사인 AMEC FosterWheeler와 합병한 바 있음. 또한 Jacobs Engineering Group은 70년 이상 석유·가스, 화학, 제약, 방위 산업에 설계 및 건설 서비스를 제공해 왔음
Larsen & Toubro	• Larsen & Toubro는 인도 원자력 발전 프로그램에 다양한 중공업 공장과 첨단 기술 또는 청정 시설 장비를 공급해 왔음
OMZ	• 러시아에 본사를 둔 전력 엔지니어링 회사로, 국영 에너지 기업 GazProm의 자회사인 GazPromBank가 대주주임. OMZ는 1998년 UralMashZavod의 기계 제작 및 제강 공장과 중동부유럽 및 아시아에 건설된 VVER용 원자로 압력용기를 비롯한 원전 장비를 공급해 온 Izhorskiye Zavody가 합병하여 설립됨
Rolls-Royce plc	• Rolls-Royce plc는 영국의 잠수함 함대용 원자력 추진 원자로를 공급하고 민간 원자력 발전소에 엔지니어링 서비스를 제공해 왔음. 2021년에는 계측·제어 시스템 역량 대부분을 Framatome에 매각함. Rolls-Royce plc는 Assystem, BAM Nuttall, Laing O'Rourke, SNC-Lavalin 및 기타 투자자들과 컨소시엄을 구성하여 내수 및 수출 시장을 위한 영국 SMR 개발을 추진하고 있음

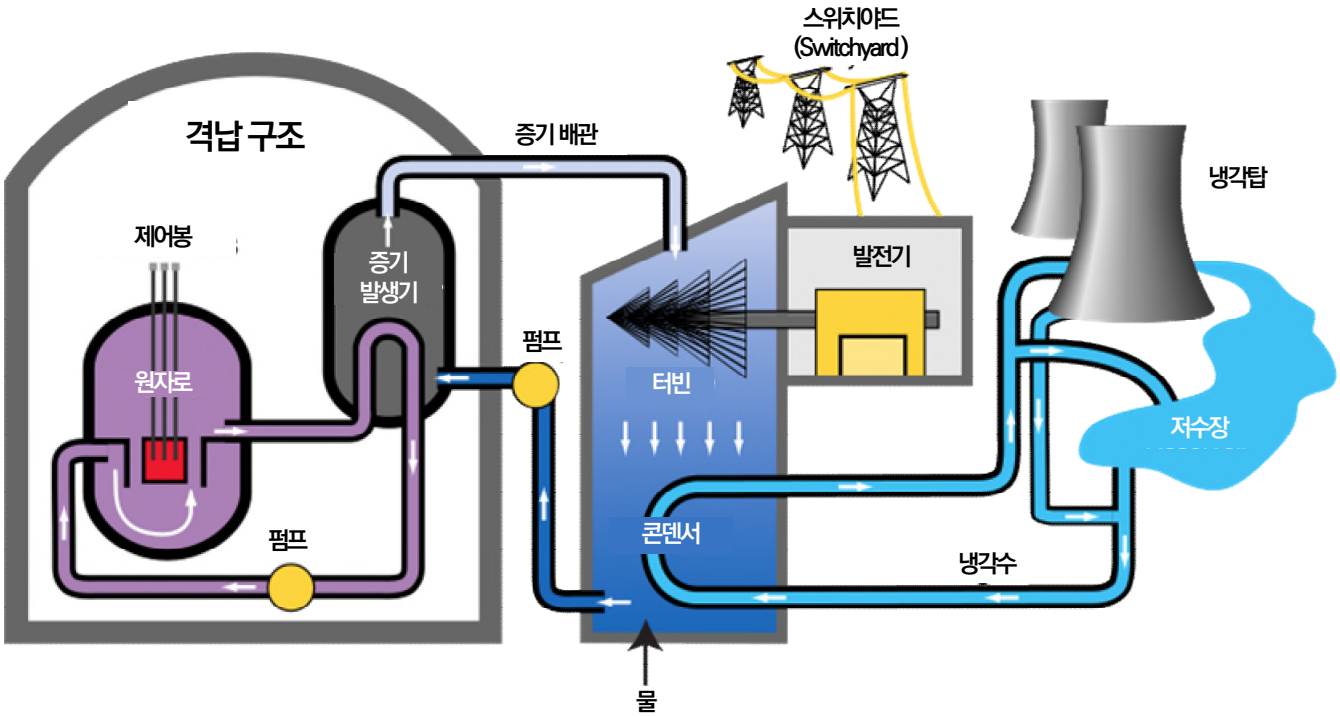
출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

제품 및 서비스 공급 범위

원자로는 정교한 엔지니어링을 통해 40~60년 동안 전기와 열을 생산하며, 일부 미국 원전의 경우 최대 80년 동안 운전할 계획임. 원자로의 주요 부품은 대부분 대형 부품이며 특수 소재로 제작되고 정밀하게 설계되어 심한 충격와 마모를 견딜 수 있음. 일부 원자로의 경우 작업자의 방사선 노출을 최소화하기 위해 코발트 함량이 낮은 스테인리스강이 필요한데, 이는 특정 니켈 광석 매장지와 원자력 산업용으로 특별히 통제된 조건으로 제조된 강철 합금을 통해 조달해야 함[33]. 계측·제어 시스템은 광범위한 조건과 기능을 모니터링하고, 디지털화와 고급 데이터 처리를 통해 더 큰 성능 및 운영상의 이점을 지원하는 상황에서도 완전한 신뢰성을 갖춰야 할 필요가 있음. 이러한 원전 건설을 위한 공급망은 아래 그림과 같이 세 가지 요소로 구분 가능함

[그림] 가압경수로(PWR)의 구조



1차 계통(Nuclear island)	2차 계통(Conventional island)	보조설비(Balance of plant)
핵증기공급계통(NSSS), 원자로 격납 건물, 주기기 및 전기계통·보조계통 (예: 사용후연료 풀)	터빈, 보조기기 및 전기 및 보조 계통, 급수 계통	송전선, 급수 및 냉각탑, 운송 및 적재 시설, 관리 및 근로자 복지 시설, 비상 시설 등

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

33) 표준 크롬-니켈 스테인리스강은 유용한 기계적 특성과 내식성을 제공하지만, 핵분열 시 고에너지 감마선을 방출하는 동위원소인 60Co로 변하는 자연 발생 코발트(59Co)가 잔류할 수 있어 건강에 유해할 수 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

원전의 이 세 가지 요소는 크게 두 가지 품질 기준으로 구분할 수 있음. 먼저 원자력 등급(nuclear grade)의 구조물·계통·기기(SSC)로, 이러한 장비는 안전, 보안, 핵물질 방호를 보장하기 위한 기술적 요건을 명시한 규제기관의 승인 표준을 충족해야 함. 이에 해당하는 품목은 원자로의 제어 및 정지, 방사선 누출 방지에 필수적인 안전 관련 품목이거나, 원전의 안전에 기여하는 안전 중요 품목임. 이러한 카테고리에 해당되지 않는 기타 SSC의 경우 상업용 등급(commercial grade)으로, 기술 공급업체가 정한 상업적 또는 일반 산업 표준을 따라야 함. SSC는 아래 표와 같이 안전 중요도에 따라 다양한 수준의 품질 보장 기준을 준수해야 하며, 공급업체는 제품이 사양에 부합하는지 확인하고 부적합 사항을 보고할 수 있도록 적절한 관리 시스템을 유지해야 함

[표] SSC의 품질 보장 요건

원자력 등급 SSC 강화된 품질 보증 프로그램 필수		**상업용 등급 SSC*** 품질 보증 프로그램 필요
안전 관련 품목	**안전 중요 품목**	
• 제조 공정은 검사, 검증 및/또는 테스트 대상 • 제조 과정에서 중대한 안전 위험을 초래할 수 있는 결함이나 규정 미준수가 발견되면 피허가자(licensee) 및/또는 규제기관에 보고하고 시정 • 특정한 실무 규범 또는 표준에 따른 성능 테스트	• 구성 요소가 안전하게 작동할 것이라는 보증 • 특정한 실무 규범 또는 표준에 따른 성능 테스트	• 우수 제조 기준(Good manufacturing practices) • 특정한 실무 규범 또는 표준에 따른 성능 테스트가 필요할 수 있음

*안전에 중요한 품목은 구매자가 품질을 보증하는 승인된 방법이 있는 경우 상업용 등급을 적용할 수 있음

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

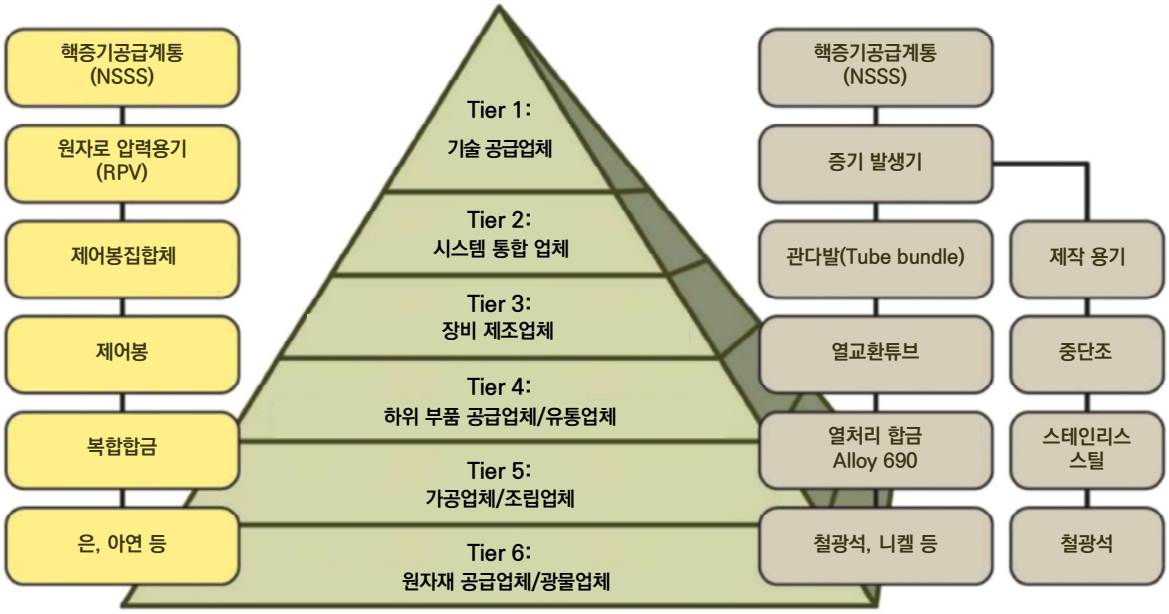
원전 공급망 계층 및 상호작용

원전 부문의 공급업체는 공급에 대한 책임 정도에 따라 분류되는 경우가 많음. 이러한 계층을 정의하는 방법은 여러 가지가 있지만 대부분 기술 공급업체는 Tier 1, 시스템 통합업체는 Tier 2, 기타 OEM 업체는 Tier 3 이상으로 분류됨. 신규 건설의 경우, Tier 1은 설계·조달·시공(EPC) 계약업체 또는 핵심 기술 공급업체, 또는 이들 간의 파트너십으로 구성됨. 아래 그림의 예시 1에서는 Tier 1 계약업체가 NSSS를 공급하지만, 조달을 수행하는 방식에 따라 턴키 계약의 경우처럼 전체 원전을 공급할 수도 있음. 또한 수직 통합 업체가 원자로 압력용기(RPV) 같은 주요 구성품의 상당 부분을 제조할 수도 있으며, 이 경우 하도급 단계가 더 적어지게 됨

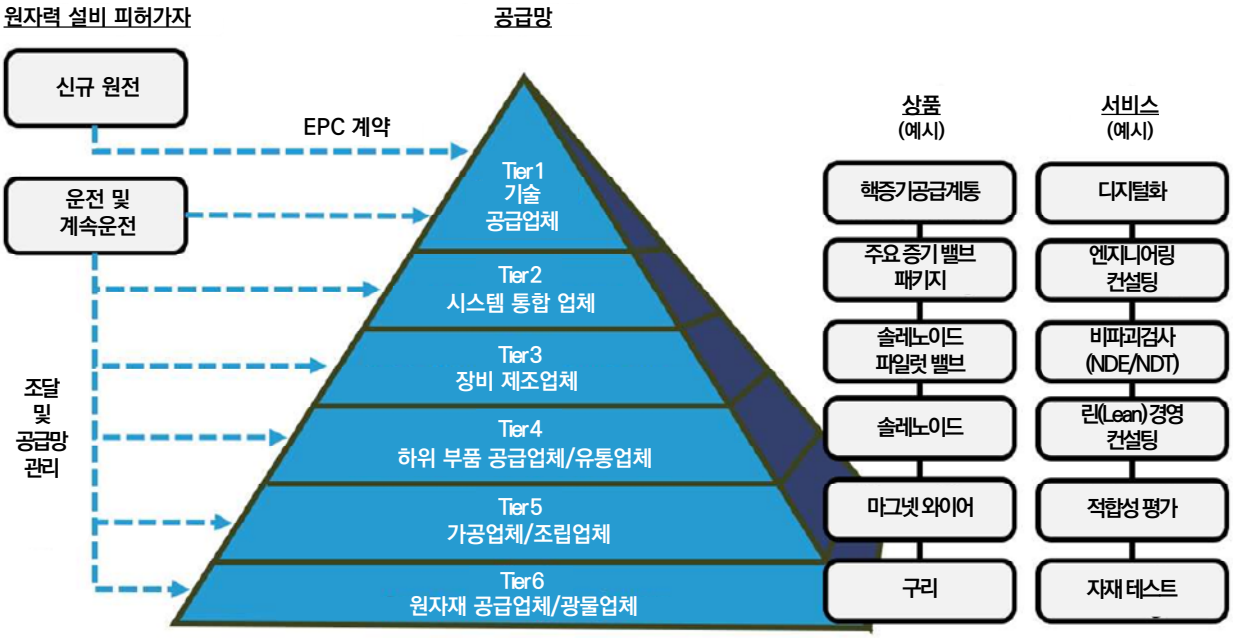
copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[그림] 원전 공급망 계층

(예시 1) 주요 중량물 공급망



(예시 2) 상품 및 서비스 공급망



출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

신규 건설 프로젝트는 일반적으로 Tier 1 기술 공급업체가 공급망을 설정하고 관리하는 방식과 관련이 있는 반면, 운전 중인 원전은 일반적으로 운전 및 정비 활동과 관련된 예비 부품 및 서비스를 Tier 3 이하 업체와 직접 거래함(위 그림의 예시 2 참조). 기술 공급업체가 내리는 결정과 조달 선택(예: 핵심 공급업체의 선택 및 위치)은 원전의 운전 기간 내내 공급망에 영향을 미치므로, 신규 건설과 운전 활동은 항상 밀접하게 연관되어 있음

Tier 1 EPC 업체가 NSSS 공급 계약을 체결한 경우, 원자로 기술 공급업체는 Tier 2 공급업체이자 시스템 통합업체가 됨. 여기서 Tier 3 업체는 증기 발생기와 같은 주요 구성요소를 제공하며, 여기에는 Tier 4 공급업체의 하위 구성요소가 포함됨. 원자력 부문에서 이러한 Tier 3 업체 중 다수는 주요 부품에 대한 자체 생산 능력을 갖춘 기술 공급업체/시스템 통합업체임. 이러한 주요 공급업체는 많은 유틸리티가 노후화된 원전을 개조함에 따라 교체용 부품 시장에서도 경쟁하고 있음

주요 시스템 및 부품 제조

GW급 원자로의 주요 구성요소로는 RPV(또는 PHWR의 압력관), 가압기 및 증기 발생기(PWR의 경우), 원자로 격납 구조물, 원자로 제어봉 및 냉각 시스템이 있음. 또한 2차측 건물(conventional island)에서 발전하려면 대형 터빈이 필요하며, 수천 개의 특수·일반 밸브와 펌프도 필요함. 계측·제어(I&C) 시스템은 발전소 운영, 보호 및 보조 프로세스의 자동 제어를 제공하며, 시스템을 구축하기 위해서는 다양한 하위 구성품이 요구됨

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

3. NSSS 구성요소 및 시스템 업체

원자로 압력용기(RPV)

대형 경수로(LWR)의 원자로 압력용기(RPV) 주요 공급업체로는 Framatome, Atomenergomash, Chicago Bridge & Iron, 두산에너빌리티, Equipos Nucleares, 미쓰비시중공업(MHI), China First Heavy Industries, Dongfang Electric Corporation, Shanghai Electrical Group, Larsen & Toubro, OMZ, Vítkovice Machinery Group 등이 있음

[표] 주요 RPV 공급업체의 최근 프로젝트

업체	내용
미쓰비시중공업(MHI)	• 핀란드의 Olkiluoto 3호기와 중국 Taishan 1호기에 RPV 공급
Dongfang Electric	• 중국 Taishan 2호기의 RPV 제작
China First Heavy Industries	• Westinghouse 감독 하에 2014년 Sanmen 2호기의 첫 번째 RPV와 AP1000 증기 발생기 제조
Shanghai Electric	• Haiyang 2호기와 Changjiang 1호기용 RPV 제작
두산에너빌리티	• UAE Barakah 원전, 중국 Sanmen 및 Haiyang 원전, 미국 Vogtle 원전 1호기에 RPV를 공급
OMZ	• 자회사인 Izhorskiye Zavody를 통해 중국 Tianwan 및 러시아 Rostov의 VVER 원자로용 RPV 공급
Atomenergomash	• 벨라루스 Ostrovets 원전에 RPV 2기 공급

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

증기 발생기 및 기타 중설비

증기 발생기(Steam Generator, SG)는 가압경수로(PWR)의 냉각수에서 2차 냉각수 회로로 열을 전달하여 증기를 생성하고 증기 배관을 통해 이를 터보 발전기로 전달함. 비등경수로(BWR)의 경우 냉각수가 원자로 압력용기(RPV) 자체 내에서 증기로 전환되기 때문에 증기 발생기가 없음. 증기 발생기는 가압중수로(PHWR)에도 사용됨. PWR은 최대 4개의 루프가 있을 수 있으며, 각 루프에는 증기 발생기가 있음. 2차 냉각수는 200°C 이상의 온도에서 증기 발생기로 들어가 300°C 이상에서 건조 증기로 빠져나감. 증기 발생기의 무게는 350~640톤, 길이는 20미터가 넘으며 수천 개의 열교환 튜브가 포함되어 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 주요 증기 발생기 공급업체

업체	내용
Framatome	• Framatome은 프랑스 북부 Jeumont-Schneider에 증기 발생기, 가압기, 펌프를 생산하는 1만 3,000㎡ 규모의 공장을 보유하고 있음. 3만 9,000㎡ 규모의 Chalon/Saint-Marcel 공장은 Olkiluoto(핀란드)와 Hinkley Point C(영국)의 유럽 가압수형원자로(EPR)용 증기 발생기를 제조함 • 또한 Framatome은 ENSA(스페인) 및 Skoda(체코)와 전략적 파트너십 관계
Ansaldo Nucleare	• Ansaldo Energia SpA의 자회사로 증기 발생기, 가압기, RPV 등 다양한 원전 설비를 공급하고 있음
Atomenergomash	• Rosatom 계열사로, 러시아 Karelia의 PetrozavodskMash 공장을 운영하며 VVER 원자로용 증기 발생기를 공급하고 있음. 이 공장은 발트해, 흑해, 카스피해와 연결된 Onego 호수에 인접해 있어 대형 부품을 바지선으로 운송이 가능함 • Atomenergomash 여러 업체와 전략적 파트너십을 체결하여 증기 발생기 및 기타 중설비 일부를 하청 공급할 수 있음
BWXT Nuclear Energy	• BWX Technologies, Inc. 자회사로, 1960년대부터 당시 모기업 Babcock & Wilcox 소속으로 원전용 증기 발생기를 제조해 온 역사를 가지고 있음 • 북미 및 전 세계 원전에 증기 발생기 300대를 공급했으며, 대부분 캐나다 온타리오주 Cambridge에 위치한 3만 7,000㎡ 규모의 시설에서 생산하고 있음. 다른 시설은 미국 인디애나주 Mount Vernon과 오하이오주 Barberton에 위치해 있음 • 또한 캐나다 온타리오주의 Bruce A 및 Bruce B 원전의 원자로 6기 개보수 작업의 일환으로 증기 발생기 32대를 공급함
Dongfang Electric Corporation	• Dongfang Electric Corporation은 중국 청두의 공장에서 증기 발생기, 가압기, RPV를 제조하고 있음
두산에너빌리티	• 미국, 중국, UAE의 원전에 증기 발생기를 공급하고 있으며, 체코 플젠에 위치한 Doosan Skoda Power도 증기 발생기와 열교환기를 공급하고 있음
Equipos Nucleares SA (ENSA)	• 스페인 산탄데르 공장의 크레인 용량을 1,300톤으로 늘려 더 큰 단조 부품을 처리할 수 있게 되었음
Harbin Electric Corporation	• ENSA와의 계약에 따라 Sanmen 2호기에 증기 발생기를 공급했으며, 주요 제조 시설은 헤이룽장성 하얼빈과 허베이성 친황다오에 있음
현대중공업	• 고리 원전 1호기의 증기 발생기를 교체함
Joseph Oat Corporation	• 미국 뉴저지주 캠든(Camden)에 위치한 1만 1,000㎡ 규모 공장에서 최대 200톤의 설비를 처리할 수 있음. 압력용기, 캐스크, 열교환기를 제조함
Larsen & Toubro Ltd	• 인도 하지라와 뭄바이에 중공업 시설을 갖추고 있어 여러 개의 대형 제작을 동시에 처리할 수 있음
Mangiarotti Nuclear SpA	• 이탈리아 우디네의 몬팔콘(Monfalcone)과 파넬리아(Pannellia)에 위치한 기존 사업장과 가까운 산 조르지오 디 노가로(San Giorgio di Nogaro)에 5만㎡ 규모의 현대식 중장비 작업장을 보유하고 있음. 2014년 재정적인 문제를 겪은 후 Westinghouse에 인수됨
미쓰비시중공업(MHI)	• 고베 조선소 및 기계 공장에서 100대 이상의 신규 및 교체용 증기 발생기를 제조함. 1970년 이래로 일본의 모든 가압경수로(PWR)에 증기 발생기를 공급했음. MHI는 2007년 러시아 시장에 가스 및 증기 터빈을 공급하기 위해 Urals Turbine Plant (UTZ)와 계약을 체결함
Shanghai Electric Nuclear Power Equipment Co. Ltd	• ShanghaiElectric Group 계열사로, ENSA와 협력하여 Haiyang 원전용 증기 발생기를 제조함. 또한 역대 최대 규모의 CAP1400용 증기 발생기(24m 높이, 1대당 무게 800t)를 제조한 바 있음
Vítkovice Machinery Group	• 체코 오스트라바(Ostrava)에 본사를 둔 기업으로, Temelín 및 Dukovany 원전의 증기 발생기를 공급
ZiO-Podolsk	• 러시아 모스크바 인근에 본사를 두고 있으며 러시아 및 해외 원자로에 최대 430t 무게의 증기 발생기를 공급함

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

일반적으로 증기 발생기 제조업체는 원전에 가압기, 응축기 및 열교환기를 공급하며, 계속운전을 위한 보수 프로그램의 일환으로 상당한 교체 부품 시장이 형성되어 있음. 노후화로 인한 튜브의 성능 저하, 즉 '튜브 막힘(tube plugging)' 현상은 증기 압력 감소로 이어지며, 이는 원전의 전기 출력에 영향을 미칠 수 있음. EDF는 Framatome 및 ENSA에 총 11억 유로 규모의 교체용 증기 발생기 32대, Westinghouse에 총 5억 4,500만 유로 규모의 증기 발생기 12대 등 대규모 주문을 진행한 바 있음. Babcock & Wilcox(현 BWX Technologies)는 2002년 미국 발전소에 첫 교체용 증기 발생기를 공급한 데 이어, 2007년에는 캐나다 Bruce Power의 원전 개보수 작업을 위해 증기 발생기를 공급함

원자로 냉각계통

전문 밸브 및 튜브는 Alfa Laval, Armatury, Daher, Larsen & Toubro, Nippon Steel, Sandvik, Trillium Flow Technologies, Vallourec 등에서 제조함. 펌프와 밸브를 포함하여 유량 제어 시스템을 제공하는 수많은 OEM이 있음. 펌프는 여러 NSSS에 있어 필수적인 기능이며, 원자로에 있는 대부분의 펌프는 원심 펌프임. 이는 원자로 냉각재 시스템, 급수 시스템, 응축수 및 순환수 시스템, 잔열 제거 시스템, 비상 노심 냉각 시스템 등 여러 시스템에서 사용됨. 펌프는 원자로의 안전성과 관련이 있으며 원자로의 운전기간 동안 거의 지속적으로 작동하거나, 정지 상태에서 언제든지 작동할 수 있도록 준비되어 있어야 함. 일부는 열악한 환경에서도 지속적이고 안정적으로 작동할 수 있어야 함. 따라서 이러한 부품은 상당한 기계적 스트레스를 받게 됨. 대부분의 왕복 펌프는 복동식(double-acting) 밸브가 존재하며, 펌프 자체에서 발생하는 압력으로부터 펌프를 보호하기 위한 압력 릴리프 밸브도 있을 수 있음

원자력 발전소 전체에 걸쳐 수백 개의 밸브가 필요하며, 이러한 밸브에는 회전식(볼·플러그·디스크) 또는 선형(글로브·게이트) 밸브가 있음. 밸브는 유체의 흐름을 조절하는 데 사용되며 공압식(공기 작동식 밸브), 전기식(모터 작동식 밸브) 또는 수동으로 작동함. 모터의 일종인 액츄에이터는 주요 증기 배관, 환기 시스템, 서비스 용수 시스템, 원자로 격납 시스템에서 밸브를 작동하는 데 사용됨. 안전 관련 시스템에서 전기 밸브 액츄에이터는 평상시에는 유휴 상태이며 비상시 냉각수 흐름을 제어하기 위해 작동하는 경우가 대부분이므로 신뢰성이 높아야 함. 또한 유량 시스템에는 시스템을 보호하기 위해 압력 릴리프 밸브가 필요함. 산업 통합과 제조 시설의 현지화로 인해 여러 전문 기업이 형성되었으며, 원심 펌프(centrifugal pump), 밸브 및 액츄에이터의 주요 공급업체는 다음과 같음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 주요 펌프 공급업체

업체	내용
Afrikantov OKBM	• 러시아 국영기업 Rosatom 계열사로, 러시아뿐만 아니라 중국 Tianwan과 인도 Kudankulam에 건설 중인 원전용 펌프를 비롯해 1차 및 순환 펌프를 설계 및 제조하고 있음
Framatome	• 원자로 냉각수 펌프 및 기타 전동 펌프를 직접 또는 하위 공급망과 협력하여 제조
Intelenergomash	• Atomenergomash 자회사로 2006년 펌프 및 밸브 제조를 통합하기 위해 설립되었으며, 2007년 체코의 공급업체 Arako를 인수함
Dongfang Electric Corporation	• 원자로 냉각수 펌프 부문에 Framatome과 합작 투자를 하고 있음
Celeros Flow Technology	• Balcke-Dürr, Copes-Vulcan, Clyde Union Pumps 등 원자력 산업에서 오랜 역사를 가진 공급업체들이 합병한 기업으로, 2020년 SPX(Sealed Power Corporation)에서 분사하여 사모펀드 Apollo Global Management Inc에 인수됨
Curtis-Wright Flow Control Co.	• 1950년대부터 펌프, 밸브, 액추에이터 등 원전용 장비, 모터, 시스템을 공급해 왔으며, 미 해군 및 민간기업에 모터, 발전기, 펌프, 프로펠러를 공급하는 전문 사업부를 보유하고 있음
EBARA Corporation	• 일본 하네다와 후츠, 중국(EBARA Boshan Pumps Co. Ltd)에 제조 시설을 보유
GE Power	• 급수, 응축수 추출, 냉각 및 잔열 제거 용도로 원래 Alstom(2015년 인수)이 제공하던 다양한 펌프를 공급
Flowserve Corporation	• 원자로 내에서 사용되는 Class 1 펌프 등을 원자력 산업에 오랫동안 공급해 온 공급업체로, Byron Jackson, Durco, SIHI 등의 브랜드를 보유하고 있음. 인도 타밀나두주 Coimbatore에 9,300㎡ 규모의 제조 시설을 갖추고 내수 및 수출 시장을 공략하고 있음
Hayward Tyler Inc.	• Babcock & Wilcox Canada Ltd.의 펌프 사업부와 Westinghouse의 응축수 펌프 사업부를 인수하여 설립되었으며, 다양한 PWR의 1차 및 2차 냉각 시스템용 순환 펌프를 제조
HMS Pumps	• 러시아 Livny에 본사를 둔 업체로, 원자력 발전소를 비롯한 극조건용 펌프를 공급하며 우크라이나 Sumy에 원자력 관련 제조시설을 보유
Kirloskar Brothers Ltd	• 인도 최대 유체 처리 설비 전문업체로 중수 및 냉각수 펌핑용 펌프와 밸브를 공급하며, 여러 제조 시설을 보유하고 있음
KSB AG	• 유럽, 중국, 한국, 미국에 PWR용 원자로 냉각수 펌프, 급수 및 응축수 펌프, 안전 주입 펌프를 공급하는 업체로, 독일, 프랑스, 미주, 아시아(중국 상하이, 인도 푸네 등)에 생산 시설을 보유
미쓰비시중공업(MHI)	• RCP를 포함한 다양한 펌프를 제조하며, 2010년에 원자력 산업용 펌프 공급을 위해 Weir Engineering Services와 합작 투자 계약을 체결함 • 2019년 Hinkley Point C 원전을 건설하는 EDF 자회사 Nuclear New Build로부터 계약을 수주함
Siemens Energy	• 2014년 9월, 미국 원자력 발전소에 Terry 증기터빈과 펌프용 구동 시스템을 공급한 Dresser-Rand를 인수
Sulzer Pumps	• Renova Group 자회사로, PWR, BWR, PHWR에 펌프와 밸브를 공급하고 있으며 프랑스 Buchelay, 핀란드 Kotka, 브라질 Jundiaí, 중국 랴오닝성 다롄과 장쑤성 쑤저우에 제조 공장 보유
Teikoku Electric Manufacturing	• 미국 제조업체 Chempump를 인수하였으며 순환 및 화학물질 펌프, 유량 제어 시스템용 밀폐형 펌프를 제공
Trillium Flow Technologies	• 펌프와 컴프레서 공급업체로, 프랑스, 영국, 중국에서 원전 설비 부품 공급 사업을 운영하고 있음. 2019년 사모펀드 First Reserve가 인수하기 전까지는 Weir Group 계열사였으며, Gabbioneta 및 Begemann 원심 펌프 브랜드를 통합함

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 주요 밸브 및 액츄에이터 공급업체

업체	내용
Arako spol. s.r.o.	• 인도, 러시아, 동유럽의 원전에 밸브를 공급해왔으며, Rosatom 산하의 Atomenergomash가 자회사인 Intelenergomash를 통해 소유하고 있음
AUMA	• 독일에 본사를 두고 있으나 EU, 인도, 러시아에 자회사 또는 합작회사를 통해 생산시설을 보유하고 있으며 2004년에는 독일 Mülheim 공장을 1만 2,400㎡ 규모로 확장함
Armatury Group	• 체코 업체로 2007년 Dolni Benesov에 생산 시설을 열었으며 원자력 산업용, 특히 VVER 원자로용 고압 밸브를 공급해 왔음
Baker Hughes	• 2011년부터 GE Energy가 대주주로 있으며 PWR, BWR, PHWR용 압력 릴리프 밸브 브랜드를 보유하고 있음. 미국 루이지애나주 Alexandria에 위치한 주요 시설의 생산 면적은 2만 3,000㎡ 규모이며, 중국 장쑤성 쑤저우에 7,400㎡ 규모의 공장을 새로 설립함
Bernard Controls Group	• 전 세계 100개 이상의 원자로에 원자로 격납건물 내·외부용 액츄에이터를 공급해 왔음. 공장은 파리 외곽의 Gonesse에 있으며 중국 베이징과 미국 텍사스에도 제조 공장이 있음
Celeros Flow Technology	• BWR, PWR, PHWR용 Copes-Vulcan 제어 및 격리 밸브와 액츄에이터를 제공
Conval Inc.	• 미국 코네티컷주 서머스에 위치한 Conval은 원자력 산업에 Clampseal 단조 스틸 밸브를 공급함
Daher Group	• 방위 및 원자력 부문에서 오랜 역사를 가진 프랑스 해운회사로, 2011년 원전용 밸브 제조업체인 Vanatome을 인수함. 또한 석유·가스, 화력 발전 및 기타 부문에 Verdelet 브랜드의 밸브를 공급함
Emerson Electric	• 여러 브랜드로 전력 산업에 계측·제어 및 자동화 기술을 제공하고 있음. 원자력 부문에서 대표적인 브랜드는 Fisher Controls International로, 중국과 미국의 AP1000 원전을 포함해 PWR 및 BWR용 제어 밸브와 액츄에이터를 공급해 왔음. 또한 BWR, PWR, PHWR에 사용되는 솔레노이드 작동 밸브, 스위치 및 액츄에이터 등을 아우르는 ASCO Valve 브랜드도 소유하고 있음
Flowserve Corporation	• Atomac, Durco, Gestra, Valtek 등의 브랜드를 통해 밸브를 공급하고 있으며 중국에 증기 차단 밸브와 Limitorque 액츄에이터를 공급함. 2013년에 L&T Valves와의 합작회사 지분을 완전히 인수하였으며, 인도 첸나이 인근 공장에서 플러그 및 버터플라이 밸브 Serck AUDCO 브랜드와 VOGT 단조 게이트, 체크 밸브를 제조함
Guichon Valves	• 프랑스 Rhône-Alpes주 Chambéry에 위치한 공장에서 원자력 산업에 적합한 볼 밸브와 글로브 밸브를 공급하고 있음
Högfors Oy	• 2009년 핀란드 Salo에 밸브 공장을 설립했으며, 핀란드 원자로 및 전 세계에 버터플라이 밸브를 공급
KSB AG	• 브라질 Angra 2 원전에 5,000개의 밸브를, 핀란드 Olkiluoto 3 원전에 1,000개 이상의 밸브를 공급
Larsen & Toubro Ltd	• 인도 첸나이에 밸브 사업부(L&T Valves)를 두고 있으며 인도 타밀나두주 Coimbatore에 첨단 밸브 생산시설을 보유하고 있음
Oka Ltd	• 원전용 안전 밸브 전문 업체로, 이란(Bushehr), 인도(Kudankulam), 러시아 발전소에 제품 공급
Okano Valve Manufacturing	• BWR용 압력 안전 밸브를 공급
Pentair	• 미국 미니애폴리스에 본사를 둔 액츄에이터, 밸브 및 유량 제어 시스템 공급업체로 2012년 LWR 증기 차단, 압력 릴리프 및 안전 밸브 브랜드 Crosby, SABO, Sempell 등을 보유한 Tyco Flow Control 사업부와 합병함
Rotork	• 원자력 산업용 전동 액츄에이터와 기어박스, 유체 동력 밸브 액츄에이터를 공급하며, 영국 Bath, 이탈리아 Lucca를 비롯해 아시아와 미국에 제조 시설을 보유
Thompson Valves	• 영국 IMI Nuclear의 계열사인 Thompson Valves는 Ashford 브랜드를 통해 다양한 LWR, PHWR 및 가스 냉각 원자로용 안전 밸브를 공급해 왔음
Toa Valve Engineering	• 일본 기업으로, BWR용 증기 차단 밸브, 압력 릴리프 밸브 등을 공급
Trillium Flow Technologies	• 고온에서 작동하도록 설계된 특수 원자력 밸브인 Sarasin, Sebim 제품군을 제조하고 있으며, Atwood & Morrill(단열 밸브), Batley 및 Tricentric(버터플라이 밸브), Hopkinsons(게이트 및 글로브 밸브) 등의 브랜드도 보유하고 있음. • 프랑스, 영국, 미국, 중국에 제조 시설을 보유하고 있으며 LWR 및 PHWR용 안전 릴리프 밸브와 메인 증기 격리 밸브를 공급
TyazhPromArmatura	• 2009년 러시아 Tula 지역의 Aleksin 공장에 화력 발전소 및 원자력 발전소용 첨단 밸브를 생산하는 신규 공장 가동
Velan	• EPR 원자로용 제어 밸브와 LWR 및 PHWR 원자로용 밸브를 공급

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

터빈

발전 용량이 1000MWe 이상인 대형 원전에는 일반적으로 저속(주파수에 따라 1500 또는 1800rpm) 터빈이 사용됨. 이러한 터빈은 Atomenergomash(Rosatom 자회사), 두산에너빌리티, GE Power(Alstom과 합병), 미쓰비시중공업, Siemens, SilMash, OMZ 등에서 제조함. 중국에서는 Dongfang Electric Corporation, Harbin Electric, Shanghai Electric Group이 시장을 선도하고 있음. 인도에서는 Bharat Heavy Electricals (BHEL)과 Larsen & Toubro가 주요 공급업체임. BHEL과 GE는 인도 구자라트주 Sanand에서 700MW 규모의 원자력 증기 터빈을 제조하기 위해 협력하고 있음. 2022년 EDF와 GE는 EDF가 GE Steam Power의 원자력 발전 사업 일부를 인수하는 계약을 체결함. 이는 EDF 그룹 내에 글로벌 증기 터빈 장비 및 서비스 공급업체를 설립하는 것을 목표로 함. 2022년에 체결된 또 다른 주목할 만한 파트너십은 한국수력원자력이 이집트 El Dabaa 원전용 터빈 건물을 Atomenergomash/Rosatom에 공급하기로 한 계약임

계측·제어 시스템

계측·제어(I&C) 시스템은 원자로 운전, 보호 및 보조 프로세스를 제어함. I&C 시스템 아키텍처에는 센서, 케이블, 프로그래머블 로직 컨트롤러(programmable logic controller, PLC), 감독 제어 및 데이터 수집 장비를 포함한 하드웨어와 인간-시스템 인터페이스를 제공하는 소프트웨어와 같은 많은 하위 구성요소가 포함됨. 정상 작동 및 지정된 비정상 상황에서 안전 및 비안전 관련 기능을 지원함. 구성요소 또는 장치 수준의 제어에는 종종 간단한 로직 기능(예: 켜기/끄기)이 포함됨. 중간 수준에서는 시스템이 필요한 매개변수 내에서 변수를 유지하도록 제어하고, 플랜트 수준에서는 전체 운영 방식을 제어함. 또한 안전을 보장하기 위해 운전 시스템 제어는 원자로 보호 시스템과 독립적으로 이루어짐. 디지털 I&C 시스템은 1980년대에 유럽, 일본, 북미의 원전에 도입되었음. Candu, Combustion Engineering, Framatome, GE, Hitachi, Minatom(현 Rosatom), Westinghouse는 거의 모든 제어 시스템에 디지털 기술을 도입한 최초의 원자로 공급업체임. 원전용 I&C 기술의 진화는 크게 세 가지 세대로 구분할 수 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] I&C 기술의 세대 진화

세대	내용
1세대	• 다이얼 디스플레이, 수동 스위치, 푸시 버튼이 있는 메인 제어 보드용 하드웨어 계측기, 각 기능을 개별적으로 제어하는 유선 아날로그 분산제어시스템(DCS)으로 구성 • DCS를 사용하면 각 기능을 독립적으로 작동할 수 있으므로 한 시스템에 장애가 발생하더라도 영향을 제한할 수 있음
2세대	• 메인 제어 보드용 음극선관 모니터, 개별 컨트롤러에서 제어 및 자가 진단을 위해 컴퓨터 기반 알고리즘을 사용하는 데이터 처리 장치로 발전한 디지털 DCS.
3세대	• 평판 액정 모니터 및/또는 터치 스크린과 발광 다이오드 시각 정보 디스플레이를 갖춘 메인 제어 보드의 소프트웨어 운영 • 시스템 간 상호 운용성이 우수하고 완전히 통합된 컴퓨터 제어 기능을 갖춘 고속 통신 네트워크로 연결되고 더욱 컴팩트해진 첨단 디지털 DCS • 현장 프로그래밍이 가능한 게이트 어레이를 통해 소프트웨어 오류 및 일반적인 원인의 장애 가능성을 축소

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

아날로그에서 디지털 I&C 시스템으로의 전환은 더 높은 신뢰성과 진단 기능을 제공했지만, 동시에 도전과제를 제시했음. 일반적인 원자로에는 10,000개의 센서와 5,000km의 I&C 케이블이 있어 시스템 복잡성이 매우 높음. 마이크로프로세서 칩과 컴퓨터 기술의 급속한 발전과 함께 디지털 I&C 시스템이 대중화되고 선호되고 있음. 그러나 구형 플랜트에서는 아날로그와 디지털 기술이 혼합되어 사용되며 기술 발전 속도가 빠르기 때문에 노후화가 지속적으로 발생함

디지털 I&C 장비는 아날로그 시스템보다 물리적 부피와 케이블을 훨씬 적게 차지함. 디지털 시스템의 주요 장점은 아날로그 시스템보다 훨씬 더 오랫동안 교정 상태를 유지하고 측정 드리프트(measurement drift, 측정자의 영향과 반복측정에 의한 측정값의 차이를 의미)의 영향을 덜 받는다는 점임. 또한 작동 파라미터를 보다 유연하게 구성할 수 있고 향상된 자가 진단 및 모니터링 기능을 제공함. 그러나 디지털 시스템의 검사 및 검증(V&V)은 일반적으로 더 어려움

구성 및 문서 관리는 모든 구성요소에 적용되는 품질보증(QA) 문제이나, 디지털 I&C 시스템의 경우 소프트웨어 및 하드웨어 항목의 수와 이러한 항목을 지원하는 관련 문서의 수가 특히 많음. 또한 소프트웨어는 일반적으로 시운전 전후에 매우 많은 수의 수정이 이루어짐. 취약하거나 피상적인 구성 관리 프로세스는 소프트웨어 수정 또는 디지털 I&C 업그레이드 과정에서 발견되는 많은 어려움의 근본적인 원인인 경우가 많음. 인프라 및 서비스는 전반적인 V&V 테스트를 포함하여 시스템 및 하위 구성요소의 장비 검증(equipment qualification, EQ) 측면을 위해 필요함

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

스마트 디바이스

스마트 디바이스는 일반적으로 마이크로프로세서 또는 기타 프로그래밍 가능한 전자 부품을 기반으로 함. 최종 사용자는 특정 형태의 기능을 제공하기 위해 디바이스를 일부 제한적으로 구성할 수 있음. 구성 가능성(Configurability)은 온라인 모니터링, 보정 및 진단을 위한 유연성, 정확성 및 기능과 같은 이점이 있지만 디지털 시스템에서는 자격 및 규제 승인을 위한 복잡성을 가중시킬 수 있음. 원자력 안전 규제기관은 모든 I&C 업그레이드가 안전성을 유지하거나 향상시킨다는 점에 만족해야 함. 이는 모든 주요 구조물·계통·기기(SSC)에 해당되며 운영 경험이 없거나 제한적인 경우 합의를 도출하기 어려움. 맞춤형 소프트웨어 애플리케이션에는 감지되지 않을 수 있는 잠재적인 설계 결함이 있을 수 있는 반면, 일반적으로 사용되는 소프트웨어의 경우 사용자 수가 많기 때문에 결함이 발견될 수 있음. 이는 원자력 발전소 환경에서 일부 스마트 디바이스를 사용할 때 특히 문제가 됨

일반적인 스마트 지원 SSC에는 감지 기기를 통한 작동식 제어 밸브, 가변 주파수 컨트롤러, 모터 스타터 등이 있음. 그러나 원전의 특정 애플리케이션에 대한 스마트 디바이스의 자격을 갖추려면 공급업체로부터 임베디드 소프트웨어의 소스 코드에 대한 독립적인 액세스가 필요할 수 있으며, 이는 상업적 기밀 유지의 이유로 확보하기 어려울 수 있음. 때로는 피허가자가 패키지로 제공되는 장비에 임베디드 소프트웨어가 있다는 사실조차 파악하기 어려운 경우도 있음. 이는 디지털 기능이 강화된 SSC가 더 많이 생산됨에 따라 문제가 되고 있음

이에 따라 최근 원자력 규제기관은 스마트 디바이스 사용에 대한 지침과 의견을 발표하고 있음. 영국 원자력규제청(ONR)은 영국 HPR1000 및 Westinghouse AP1000에 대한 일반 설계 평가의 일환으로 여러 스마트 디바이스를 승인했으며, 미국에서는 원자력규제위원회(NRC)가 스마트 디바이스 사용에 대한 지침을 발표함

I&C 시스템을 통한 혁신 도입

머신러닝 및 인공지능과 같은 지원 기술은 운영자에게 다양한 수준의 자율성과 데이터 분석을 제공하여 의사결정에 정보를 제공하는 새로운 I&C 시스템에 더 많이 등장할 것으로 전망됨. 이는 SMR 시장을 위한 새로운 시스템의 핵심 동력이 될 것으로 예상됨. 신뢰성 향상, 원자로 트립 및 예기치 않은 가동 중단 시간 감소, 운영자에게 위험을 경고하는 향상된 자가 진단 기능 등의 이점은 정기 검사의 감소로 이어질 수 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

사이버보안

디지털 I&C 시스템의 주요 우선순위 중 하나는 사이버보안 위협에 강력하게 대응하는 것임. 디지털 신호는 바이너리 형식으로 전송되기 때문에 쉽게 압축 및 암호화할 수 있지만 해커나 적대적인 주체에 취약할 수 있음. 원자력 업계는 미국 Davis-Besse 원전이 컴퓨터 바이러스 '슬래머 웜(Slammer worm)'에 감염되어 안전 매개변수 표시 시스템을 약 5시간 동안 사용할 수 없었던 사건, 일본 몬주 원전 및 고리 원전에서 멀웨어 공격으로 인한 정보 도난 등의 사건에서 교훈을 얻었음

사이버 영역의 기술 발전으로 인해 사이버보안 복원력에 대한 지침과 모범 사례는 규제 협력의 공통 영역이 되었으며, 국가전략과 더불어 피허가자가 사이버보안 및 정보 보증에 대한 법적 의무를 충족하기 위한 보안 체계를 개발하는 데 필요한 가이드가 마련되었음. 원자력 발전소 운영자는 국내 및 국제 표준과 규정의 지침에 따라 사이버보안 위협으로부터 디지털 I&C 시스템을 방어하기 위해 위험 관리, 보안 관리 및 V&V 관리의 프레임워크를 제공하는 보안 전략을 개발할 수 있음. 이러한 보안 전략에는 제어 통신망과 일반 통신망을 물리적으로 분리하는 '에어갭(Air Gap)' 모델, 특정 발전소 구역에서 원격 업데이트 금지 및 휴대용 저장 장치 사용 비활성화, 플래시 메모리 업데이트 시 암호화된 인증 필요, 제어 소프트웨어 수정 또는 업데이트의 직원 권한 최소화, 엄격한 인증 절차 적용 등이 포함됨

I&C 시스템 공급

원자로 공급업체는 I&C 시스템 통합업체 역할을 하며 사내에 전문 역량을 유지하는 경향이 있음. GE Hitachi, Rosatom, Mitsubishi, Toshiba 등과 같은 공급업체는 각 산하 그룹의 전자 및 ICT 역량을 요청할 수 있음. 동시에 원자로 공급업체는 방위, 항공, 자동차, 공정 산업 등 다른 산업 분야의 고객에게 서비스를 제공하는 정보 기술 및 시스템 엔지니어와 협력하여 더 폭넓은 혁신에 접근할 수 있음. 주요 전문 공급업체는 다음과 같음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 주요 I&C 시스템 공급업체

세대	내용
Assystem SA	• Assystem의 에너지 및 인프라 사업부는 2017년 AREVA/Framatome의 지분 5%를 인수
Bharat Electronics Ltd (BEL)	• 항공우주 및 방위 부문에 주력하는 인도 국영기업으로, 인도 원전의 I&C 시장에서 차지하는 비중이 작지만 꾸준히 성장하고 있음
China Techenergy Corporation (CTEC)	• 중국 국영 CGN과 Beijing HollySys의 합작회사임. CTEC는 원전의 전체 수명주기에 걸쳐 엔드투엔드 I&C를 제공하기 위해 2005년에 설립되었음. HollySys는 1993년 설립되었으며 화력발전소, 정유, 화학, 철도 신호 분야의 I&C 시스템을 구축하는 회사임
두산에너빌리티	• 국내 원전에 운영 I&C 시스템을 설치했으며, 계열사인 두산HF컨트롤스(Doosan HF Controls)는 1990년대 발전소 운영 및 보호를 위한 인간-기계 인터페이스 시스템을 국산화하는 데 기여함. 두산은 2000년 화력 및 원자력 발전소에 I&C를 공급하던 Forney Engineering을 Foster Wheeler로부터 인수해 두산HF컨트롤스로 사명을 변경함
Electronics Corporation of India Ltd	• 원자력, 우주 및 방위 부문에 주력하고 있으나 다른 산업 분야에서도 활발히 활동하고 있는 국영기업으로, 1967년 인도 원자력 프로그램의 I&C 요구 사항을 충족하기 위해 Bhabha Atomic Research Centre (BARC)의 R&D 활동을 대량 생산에 도입하기 위해 설립되었음. 이 회사는 수년에 걸쳐 수입기술 대체에 중점을 두고 인도 경제의 전략적 부문에 서비스를 제공하는 기업으로 발전해 왔음
Emerson Electric	• 거의 모든 Westinghouse 원자로에 Ovation 브랜드 또는 그 이전 버전으로 운전 제어 장치를 공급해 왔음. Emerson Electric은 1998년 Westinghouse의 I&C 역량 일부를 인수했으며, 이후 두 회사는 장기 계약에 따라 협력해 왔음
Leonardo DRS	• Leonardo DRS(구 DRS Technologies)는 2008년에 Finmeccanica(현 Leonardo SpA)에 인수되었음. 50년 동안 아날로그 제어 시스템, 개별 로직 시스템, 마이크로프로세서 기반 시스템 등 BWR 및 PWR용 I&C 보호 시스템을 공급해 왔음
Lockheed Martin	• 방위 및 항공우주 기업으로, 60년 동안 해상 추진 원자로뿐만 아니라 BWR 및 PWR에 아날로그 및 디지털 I&C 시스템을 공급해 왔음. 현재 이 회사는 하드웨어 기반 아키텍처, 솔리드 스테이트 전자 장치, 마이크로프로세서 실행 소프트웨어가 없는 아날로그 및 독립형 논리 회로를 사용하는 비디지털 I&C 보호 시스템에 주력하고 있음
Radiy Corporation	• 원래 라디오, 텔레비전 및 기타 가전제품을 제조하는 회사였으며, 1995년 I&C 장비 시장에 진출하여 우크라이나 원자로의 부품을 교체하고 현대화하기 시작함. 또한 원자력 및 화력 발전소의 전력 관리를 위한 스위치 기어 및 제어 기어 어셈블리를 제공함
Rusatom Automated Control Systems (RASU)	• 국영기업 Rosatom 산하 기업으로, 원자력 시설에 중점을 둔 여러 전문 I&C 시스템 생산업체 그룹임. 여기에는 Priborostroitelny Zavod(PSZ) 계측 공장, Start Group, Ural Electromechanical Plant Tri-Troiki 및 연구 기관이 포함됨
State Nuclear Power Automation System Engineering Company (SNPAS)	• 국가원자력기술공사(SNPTC)와 Shanghai Automation Instrumentation Corporation의 합작 회사임. 이 회사는 Westinghouse와의 계약에 따라 중국 내 AP1000 및 CAP1400 원자로에 현지화된 I&C 시스템을 제공하기 위해 2010년에 설립되었음. SNPAS는 또한 Lockheed Martin과 계약을 맺고 텍사스 포트워스에 있는 R&D 시설을 공동 운영하고 있음
Framatome	• Framatome의 I&C 사업부는 업그레이드 및 현대화부터 신규 건설 프로젝트까지 플랜트 자동화 및 계측 시스템을 제공함. 2018년에는 Schneider Electric의 원자력 I&C 부문을, 2021년에는 Rolls-Royce의 I&C 사업부를 인수하여 유럽, 북미, 아시아 지역 시장을 커버할 수 있게 됨

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

Ⅳ. 원자력 공급망 인프라

1. 공급망 인프라 산업
2. 원전 건설·운전 주요 원자재
3. 공급 현지화 및 글로벌화
4. 공급망 운영 및 최적화

1. 공급망 인프라 산업

원자력 산업의 특수한 특성으로 인해 자재와 부품은 상대적으로 제한된 수의 공급업체로부터만 공급받을 수 있음. 일부 부품은 특정 원자로 설계를 위해 특별히 제조되며, 이에 따라 각 원자로 공급업체와 관련된 전용 공급망이 존재함. 그럼에도 원전의 건설과 조달은 글로벌 시장의 경쟁이 치열함

2011년 일본 후쿠시마 원전 사고 이후 일부 원전 건설 계획이 취소되는 등, 여러 요인으로 인해 중단조 용량 문제와 같은 공급망 병목 현상에 대한 과거의 우려는 다소 완화되었음. 기존 공급업체의 투자와 기술 이전 및 제조 현지화로 현재 알려진 원전 건설 계획에 따라 주요 원자로 부품을 제작할 수 있는 공급업체가 충분히 확보되었음. 중소형 원자로 및 GW급 원자로 도입의 성장 전망에 따라 동시에 여러 원자로를 주문할 경우 병목 현상이 다시 나타날 수 있음. 그러나 원전 공급 계약은 오랜 시간이 소요될 수 있으며, 공급망 인프라에 대한 국제적인 민관협력과 자금 지원을 통해 이러한 문제를 완화할 수 있음

중단조 제조

복잡하거나 무거운 단조품, 튜브 및 밸브는 원전에서 가장 중요한 구성요소임. 3세대 발전소의 격납용기와 원자로 용기 구성품, 터빈 로터와 증기 발생기는 약 200개의 단조품으로 만들어지며, 그 중 일부는 무게가 각각 500~600톤에 달하는 4,000톤이 넘는 강철로 만들어짐. Framatome의 EPR(European Pressurised Reactor)에는 각각 최대 500톤에 달하는 증기 발생기 4대가 사용됨. Westinghouse의 AP1000에 사용되는 가장 큰 부품의 잉곳 무게는 최소 350톤임. 이렇게 큰 고온의 강철 잉곳을 소화할 수 있는 단조 프레스의 수는 제한되어 있음. 중국, 일본, 인도, 러시아, 한국, 미국에서 약 140~150MN(14,000~15,000톤) 용량의 단조 프레스가 운영되고 있음

아래 표는 단조 프레스 용량 현황이며, 이는 전 세계에 연간 약 30기의 대형 원자로 부품 세트를 생산할 수 있는 충분한 용량이 있음을 시사함. 현재 원자로 주문 수요가 연간 약 10기라는 점을 감안하면 이는 충분한 규모이지만, 원자로 주문이 이 수준 이상으로 증가할 경우 추가적인 단조 용량이 필요할 것으로 예상됨. 또한 이러한 중단조 제조 용량은 석유화학 산업, 조선용 구동축, 우주선용 연료 탱크 등 다른 산업의 압력용기를 제조하는 데에도 사용됨

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 원자력 산업용 중단조 용량 현황 (2022년)

업체	중단조 용량 (톤)	최대 잉곳 규모 (톤)	연간 생산 RPV(또는 기타 주요 부품) 세트 (개)
Japan Steel Works (일본)	14,000 x 2	650	12
Japan Casting & Forging Corp. (일본)	13,000	500	
두산에너빌리티 (한국)	17,000	540	
China First Heavy Industry (중국)	15,000 & 12,500	600	5
China Erzhong & Dongfang (중국)	16,000 & 12,700	600	5
Harbin Boiler (중국)	8000		
Shanghai Electric Group (중국)	16,500 & 12,000	600	6
Bharat Forge (인도)	14,000		
Bharat Heavy Electricals (인도)	10,000		
Larsen & Toubro (인도)	10,000	400	
Heavy Engineering Corporation (인도)	6000	250	
OMZ Izhora (러시아)	15,000	600	4
OMZ Pilsen Steel (체코)	12,000	250	
Vitkovice Heavy Machinery (체코)	12,000	250	
Pilsen Steel, Plzen (체코)	12,000	250	
Framatome, Le Creusot Forge (프랑스)	11,300 & 9000	500	
Società delle Fucine (ThyssenKrupp) (이탈리아)	12,600	530	
DCD Dorbyl (남아공)	14,000	500	
Saarschmiede GmbH (Saarstahl) (독일)	12,000	370	
Sheffield Forgemasters (영국)	10,000	〉200	
Forgiatura A. Vienna (GIVA) (이탈리아)	6000	150	
Lehigh Heavy Forge Corp. (미국)	10,000	270	
Allegheny Technologies Inc. (미국)	15,000	175	
North American Forgemasters PA, (미국)	10,000	170	

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

설계·조달·시공(EPC)

원전 건설이 확대됨에 따라 프로젝트 관리를 위해 고용된 설계·조달·시공(EPC) 계약업체의 참여가 늘어날 가능성이 높으며, 이는 때로 턴키 방식으로 이루어지기도 함. 원전 건설 경험이 거의 없거나 전혀 없는 국가의 유틸리티 및 정부 기관은 프로젝트에 수반되는 엔지니어링 제공의 복잡성을 관리하기 위해 EPC 계약업체의 역량에 의존할 수 있음. 대부분의 경우 EPC 계약업체는 다른 산업 분야의 프로젝트 관리 및 건설 경험과 최근의 원전 건설 모범 사례에 익숙함. 신뢰할 수 있는 통합 공급망을 구축하기 위해서는 EPC 계약업체와의 파트너십이 필수적임. 따라서 EPC 계약업체는 일반적으로 첫 번째 주요 조달처 중 하나이거나 입찰 또는 프로젝트 개발 과정의 일부로 공급업체와 파트너십을 맺을 가능성이 높음

EPC 계약업체의 역할

신규 원전 건설 진행 시 프로젝트 관리 및 거버넌스와 관련된 여러 가지 요인으로 인해 비용이 초과하는 경우가 발생할 수 있음. 여기에는 △상세설계가 완료되기 전에 공사를 시작하여 설계 수정이 지연되는 경우 △규제 요건을 파악하지 못하고 이를 상세설계 및 조달 전략에 반영하지 못하는 경우 △당사자 간의 상호 소통 문제(언어 사용 및 책임 정의의 명확성 부족 포함) △원전 소유주의 계획이 미흡한 경우 △부적절한 직원 교육 등의 사례가 포함됨. 원전 소유주와 EPC 계약업체 간의 높은 상호 의존성을 과소평가하는 것은 바람직하지 않음. 양측의 관계는 건설 프로젝트 기간 및 그 이후에도 지속되어야 하는 관계로, 원전 소유주와 EPC 계약업체가 고려해야 할 사항은 다음과 같음

[표] 프로젝트의 EPC 계약 방식

계약 방식	책임 범위	이점	리스크
멀티 패키지	• 주 계약업체가 설계·조달·시공(EPC)을 개별 패키지로 제공	• 원전 소유주가 프로젝트를 직접 관리 • 더 폭넓은 범위의 공급업체를 대상으로 패키지 입찰 진행 가능	• 발주자의 프로젝트 관리가 여러 계약업체에 분산
스플릿 패키지	• 작업에 대한 책임을 2~5개의 EPC 계약업체가 분담 (예: 1차측 건물, 2차측 건물, 토목 등)	• 원전 소유주가 프로젝트에 대한 세부적인 감독권을 유지하지만 계약업체 조정 필요	• 원전 소유주의 강력한 프로젝트 관리 조직이 없다면 리스크에 대한 책임 소재가 모호해질 우려
단일 EPC 패키지	• EPC 계약업체가 프로젝트의 모든 단계 완료 책임	• 소유주의 프로젝트 관리 조직 운영 필요성 감소	• 리스크 관리를 위해 성과에 대한 명확한 책임 필요 • 원전 소유주와 EPC 계약자 간의 긴밀하고 지속적인 관계 필요

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

또한 EPC 계약업체는 또한 환율 변동과 인플레이션으로 인한 재무 위험을 줄이는 조달 관행과 헤징(hedging) 기법을 도입할 수 있음. EPC 계약업체와 기술 공급업체 간의 전략적 파트너십이 구축되면 프로젝트는 공급업체와의 거래를 통해 소요기간이 긴 품목의 제조 능력 확보, 자재 조기 구매, 표준화된 구성요소 또는 반복 주문에 대한 대량 할인을 활용할 수 있음. EPC 계약업체는 임시 현장 시설과 서비스를 제공할 수도 있음. 추가적으로, 원전 신규 건설 프로젝트의 경험은 건설 현장의 안전 및 품질 문화 강화에 기여함. 이러한 문화는 일정 및 비용 관리보다 안전 고려 사항을 우선시하기 때문에 통합 관리 프레임워크 내에서 관리되지 않으면 비용 초과로 이어질 위험이 있음

주요 원자력 EPC 계약업체

원전 건설 경험이 있는 주요 EPC 업체로는 Atomstroyexport, Bechtel Corporation, China Nuclear Power Engineering Corp. (CNPEC), E4 Group, Fluor, 현대건설, Industrias Metalúrgicas Pescarmona SA (IMPSA), Jacobs Engineering Group, 삼성물산, SNC-Lavalin, Toshiba E&C 등이 있음. 이들 기업 대부분은 여러 산업 분야에서 국제적으로 사업을 운영하며 재생에너지, 지열·화석연료 발전소를 포함한 다양한 전력 프로젝트를 관리함

EDF, 한국수력원자력, 인도원자력공사(NPCIL) 등 다수의 유틸리티는 EPC 계약업체에 의존하지 않고 설계, 조달, 프로젝트 관리를 직접 담당함. 그럼에도, 글로벌 EPC 기업은 기술 공급업체와 함께 원자력 공급망의 국제화를 발전시키는 데 있어 상당한 역할을 할 것으로 예상됨. 이들 기업은 비원자력 분야에서 활동하는 현지 제조업체 및 건설사에 대한 접근성을 확보하고 있어 전 세계적으로 원자력 관련 역량을 확대하는 데 기여할 것임

전문·엔지니어링 서비스

원자력 산업을 위한 전문·엔지니어링 서비스는 기업이 주요 프로젝트를 실행하고 혁신을 구현하며 운영 관행을 최적화할 수 있도록 지원함. 주요 프로젝트를 계획하려면 투자자·개발업체가 자체적으로 제공할 수 있는 역량을 넘어서는 외부 정보, 분석, 설계 역량이 필요함. 필요한 서비스 유형에는 법률 및 규제 자문, 회계 및 금융 서비스, 보험, 엔지니어링 및 기술 서비스, 타당성 조사, 프로젝트 관리, 시장 조사 등이 포함됨. 엔지니어링 및 품질 관리 서비스는 원자력 공급망의 요소를 인증하거나 제3자 검사를 제공하는 전문업체가 있음. 주요 업체로는 ASME, Bureau Veritas, Cotecna, DEKRA, Intertek Moody, LRQA, SGS, TÜV, ABS Consulting, Arsenal Consulting, BCP Engineers & Consultants, IQC Inc., Project Assistance Corp., System One 등이 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 전 세계 원자력 산업에 전문 서비스를 제공하는 주요 업체

법률 서비스		금융 서비스	
• Allen & Overy • Baker McKenzie • Burges Salmon • CMS • Clifford Chance • Eversheds Sutherland • Freshfields Bruckhaus Deringer • Gowling WLG • Herbert Smith Freehills • Morgan, Lewis & Bockius	• Norton Rose Fulbright • Pillsbury Winthrop Shaw • Pittman • Pinsent Masons • Shearman & Sterling • ThirtyNine Essex Chambers • White & Case	• Barclays • BNP Paribas • Citibank • Crédit Agricole • Deutsche Bank • Credit Suisse • Gazprom • GE Capital Markets • EXIM	• HSBC • Natixis • Nordea • Royal Bank of Scotland • Sberbank • Société Générale • Standard Chartered • Sumitomo Mitsui
회계		**보험 서비스**	
• Deloitte • EY (Ernst & Young) • KPMG • PricewaterhouseCoopers (PwC)		• American Nuclear Insurers • Aon • Assuratome • Crawford • European Mutual Association for Nuclear Insurance • European Liability Insurance for the Nuclear Industry	• Marsh & McLennan • Nuclear Electric Insurance (NEIL) • Nuclear Risk Insurers • Price Forbes & Partners • Russian Association of Nuclear Insurers • SOGAZ
엔지니어링 및 기술 서비스		**전략 자문**	
• AECOM (URS) • Altran • Ansaldo Nucleare • Aquila • Arup • Assystem • Babcock International • Boccard • Boulting • Burns & McDonnell • Cockerill • ENERCON • Fugro • International Nuclear Services • HSB Global Standards • Jacobs Engineering • Mosayk	• Mott MacDonald • MPR • M+W Group • Nuclear Logistics/ Paragon • Nuvia • Power Engineers Inc. • Pöyry • Sargent & Lundy • Siempelkamp • SNC Lavalin (W S Atkins) • STUP Consultants • Tata Consulting Services • Tecnicas Reunidas • WSP Global (Parsons Brinckerhoff)	• Accenture • Booz Allen Hamilton • Boston Consulting • EY (Ernst & Young) • IBM • Lightbridge • Japan NUS (JANUS) • McKinsey & Co • NAC International • Nuclear-21	• Oliver Wyman • PA Consulting • PwC • Rider Levett Buknall • Roland Berger • Rolls-Royce • Tata Consulting Services • Turner Harris Consulting
프로젝트 관리 전략 자문 및 지원		**시장 정보 및 조사**	
• Exelon Nuclear Partners • IBM • Mitsui & Co.	• PwC • Serco • Thales • Worley Parsons	• Bloomberg • CRU • Global Trade Media • IHS • Nuclear Energy Insider	• (FCBI) • Platts (McGraw Hill) • Engerati / SPIntelligent • TradeTech • Ux Consulting

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

물류 서비스

2005년 이후 선사 간 통합으로 인해 해운동맹의 수가 10개에서 3개로 감소함. △Transport High-Efficiency Alliance (K-Line, Hapag-Lloyd, NYK, MOL, Yang Ming) △Ocean Alliance (CMA CGM, Evergreen, Cosco Shipping, Orient Overseas Container Line) △H2M Alliance (HMM, Maersk, Mediterranean Shipping Co.) 등임. 주요 해운동맹은 항공사의 공동운항(code-sharing) 계약과 유사하게 물류, 화물 추적, 정산에 대한 효율적인 공통 프로세스를 통해 전 세계로 물품을 운송할 수 있음

핵 관련 물질과 화물의 해상 운송은 화물의 보안을 위해 적절한 조치를 취할 수 있는 선사들과의 통합 시스템이 필요함. 유럽연합(EU)이나 북미자유무역협정(NAFTA)과 같은 지역별 자유무역지역은 역내 시장 내 수출 통제 시스템을 간소화하여 핵연료, 부품 및 기술 서비스가 국경을 넘어 역내 원전으로 더 쉽게 이동할 수 있도록 함으로써 에너지 안보를 강화할 수 있음. 국제해사기구(IMO)는 2030년까지 모든 선박의 탄소 집약도를 2008년 대비 40% 감축하는 것을 목표로 하고 있음. 6,000여 척의 대형 컨테이너 선박 일부에 원자력 추진을 도입하는 것은 해양에서의 에너지 전환을 촉진할 수 있는 방안 중 하나임. 현재 상업적으로 운항 중인 러시아 원자력 추진 화물선은 Sevmorput호가 유일하며, 자국 해역에 국한하여 운항하고 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

2. 원전 건설·운전 주요 원자재

원자력 공급망에서 사용되는 주요 원자재는 단기간 내에 확보 가능한 상태를 유지해야 함. 그러나 지정학적 요인 및 기타 요인으로 인해 일부 원자재를 필요한 양만큼 비용 경쟁력 있게 적시에 확보하는 데 어려움이 있을 수 있음. 예를 들어, 복합 콘크리트 구조물의 모듈화, 첨단 제조 기술의 사용과 같은 혁신을 통해 일부 원자재의 필요량을 줄일 수 있음

필요 원자재

원자력 산업에서는 다른 산업에서 비교적 흔히 쓰이는 원자재(콘크리트, 강철, 구리 등)부터 원자력 산업의 특수 원자재(특정 희토류, 붕소, 지르코늄, 특정 합금 등)에 이르기까지 다양한 원자재가 사용됨. 특히 콘크리트와 강철은 원전에서 필요한 원자재의 대부분을 차지함

콘크리트

원자력 발전소의 콘크리트(원자력 등급 콘크리트)에는 특별한 요구 사항이 있음. 건물의 구조를 형성하는 역할뿐만 아니라 경우에 따라 방사능 차폐 기능도 수행해야 함. 콘크리트는 높은 구조적 강도를 가져야 하며 사고 발생 시 상당한 열, 지진, 기타 하중을 견딜 수 있어야 함. 원자력 등급 콘크리트 가격은 비원자력 등급 콘크리트보다 2~5배 높을 수 있음. 콘크리트는 바인더(시멘트 페이스트)와 미세하거나 굵은 골재 입자가 결합하여 합성 복합재를 형성함. 시멘트는 분쇄된 석회암, 점토, 모래, 철광석을 함께 분쇄하여 균질한 분말을 만든 다음 1,400~1,600°C의 매우 높은 온도에서 가열하여 클링커를 형성하여 만든 혼합물임

원전을 건설할 때에는 일반적으로 콘크리트 플랜트가 현장에 배치됨. 재료의 공급처는 다양할 수 있는데, 예를 들어 Hinkley Point C 원전 건설 시에는 프랑스에서 시멘트를 수입하고 현지 채석장에서 골재를 공급받음. 특정 구조물의 특성에 따라 콘크리트 배합을 조정하여 강도를 높이거나, 내구성을 높이거나, 시공성을 개선할 수 있음. 경화된 콘크리트는 일반적으로 구조물의 압축 하중 지지 능력을 제공함. 철근 콘크리트는 모든 경수로 시설에 활용되는데, 원전에서 1차 인장 및 전단 하중 저항/전달을 제공하기 위해 사용되는 대부분의 연강 또는 일반 철근은 표면에 변형(러그 또는 돌출부)이 있는 일반 탄소강 봉강(bar stock)으로 구성됨. 몇몇 원전에서는 다공성 콘크리트 기초를 생산하기 위해 고알루미나 시멘트를 사용함

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

일반적인 가압경수로(PWR) 원전의 콘크리트 구조물에는 1차측 건물, 격납 내부 구조물, 2차측 건물 및 기타 구조물이 포함됨. 1차측 건물은 특히 중요한데, 방사성 물질을 가두고 운전 상태와 사고 상황에서 차폐 기능을 제공해야 함. PWR의 격납 구조물은 일반적으로 콘크리트 바닥 매트 기초, 수직 원통형 벽, 돔으로 구성됨. 격납 내부 구조물에는 슬래브 및 벽, 원자로 압력용기 지지 구조물, 원자로 차폐벽 등이 포함됨. 격납 시스템은 내진 범주 I급(Category I)에 맞게 설계되어야 하며 항공기 추락, 가연성 유체 용기 폭발, 지진, 허리케인, 홍수, 바람, 쓰나미, 극한의 기온 등 자연적 및 인위적인 다양한 외부 충격을 견딜 수 있어야 함

원전 운전기간 동안 콘크리트 구조물은 점진적으로 열화될 수 있음. 열화는 구성 재료나 기후(해안 또는 내륙 등 기후 유형 포함) 등 다양한 요인에 의해 영향을 받음. 구조물이 노후화됨에 따라 주로 환경적 영향과 관련된 열화 발생률이 증가함. 콘크리트 구조물은 내구성이 있어야 하며 원전 운전기간이 끝난 후에도 수년 동안 그 특성을 유지해야 하는데, 이 기간 동안 많은 콘크리트 요소에 접근할 수 없을 수 있음. 이러한 모든 요구 사항을 충족하려면 기술적 조치와 조직적 조치를 모두 포함한 통합적인 접근 방식이 필요함

[표] 콘크리트 구조물에 요구되는 기술적·조직적 조치

기술적 조치	조직적 조치
• 배합 후 완성된 콘크리트뿐만 아니라 모든 콘크리트 재료에 대한 엄격한 품질 관리 • 배합 공식에 따른 후속 규정 준수를 정의하고 준비 • 고품질 배합 및 올바른 배치 등을 보장	• 건설 후 검증 및 유효성 검사보다 사전 품질 보증에 더 집중 • 종합적인 품질 관리 시스템 도입 • 프로젝트의 초기 단계부터 계약업체와 폭넓게 소통

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

강철

원자력 공급망에 사용되는 주요 철강재는 다음과 같음.

- 탄소강(Carbon steel): 탄소를 함유하고 있으며 다른 금속을 합금 원소로 포함할 수도 있음. 탄소 함량이 높을수록 강철은 더 강해지지만, 탄소 함량이 2wt%를 초과하면 부서지기 쉬움. 대부분의 보일러 및 배관에는 탄소 함량이 0.20wt% 이하인 강재가 사용됨. 펌프, 밸브, 터빈 부품과 같은 장비는 더 강한 소재가 필요하기 때문에 일반적으로 탄소 함량이 최대 0.50wt% 이상인 강철을 사용함

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

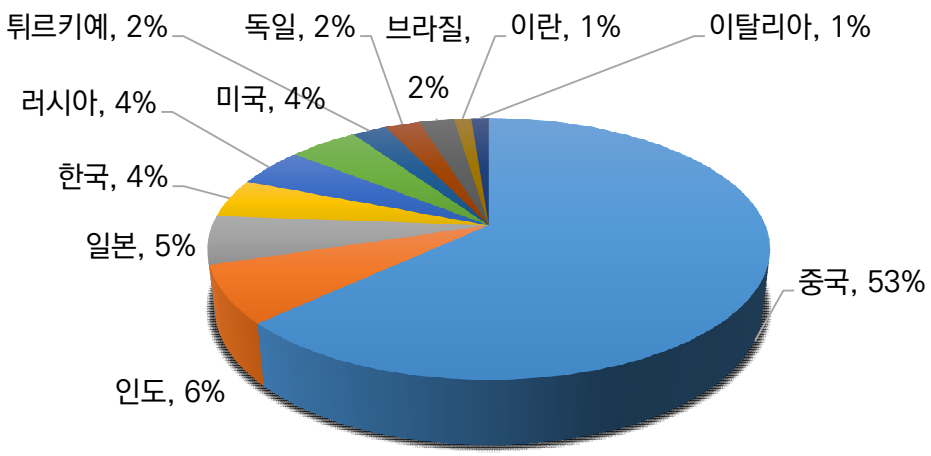
- 스테인리스강(Stainless steel): 부식에 대한 저항력이 뛰어남. 구리 또는 크롬 등의 원소를 소량 첨가하면 저합금강(low-alloy steel)도 우수한 성능을 제공할 수 있으며 다른 금속을 훨씬 더 많은 함량으로 사용할 수도 있음. 예를 들어, 최대 약 650℃의 온도에서 가동되는 가스냉각로(AGR)용 스테인리스강 연료 클래딩(cladding)에는 크롬 20wt%와 니켈 25wt%가 함유되어 있음
- 철근(Reinforcement steel): 철근 콘크리트용 철근으로 콘크리트를 강화하고 장력을 유지하기 위해 콘크리트를 보강하는 데 사용됨

새로운 기술은 원전 건설 비용을 절감하는 데 도움이 될 수 있음. 예를 들어, 서로 연결된 강철 박스 사이에 콘크리트를 끼워 넣는 Caunton Engineering社의 'Steel Bricks' 기술은 강도가 강화된 벽체를 만들 수 있음. 또한 설계 수준에서의 최적화는 향후 유사한 설계를 적용할 때 구조 및 현장 효율성을 높이거나, 콘크리트 및 철골의 양을 크게 줄일 수 있어 비용 절감에 크게 기여할 수 있음. 가능한 경우 콘크리트를 구조용 강철로 대체하는 것도 비용을 절감할 수 있는 잠재 방안 중 하나임

향상된 특성을 가진 새로운 강종 개발, 응력 부식 균열 및 피로를 완화하기 위한 가공, 열처리, 피닝(peening) 등의 표면 엔지니어링 기술 연구도 이러한 새로운 기술에 포함됨. 보다 혁신적인 솔루션으로 코팅(주로 스프레이), 다층재 또는 복합재 등도 연구되고 있음

2021년 기준 전 세계 철강 생산량은 19억 5,000만 톤으로, 전 세계에서 생산된 모든 금속의 약 90%에 해당함

[그래프] 전 세계 국가별 철강 생산 비중 (2021)



출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

단기적으로 원자력 산업이 철강 공급 부족에 직면할 가능성은 낮음. 그러나 비용 경쟁력이 있고 적절한 품질과 납기를 준수하는 자재를 확보하는 데 어려움이 있을 수 있음. 또한 철강 생산의 환경적 측면으로 인해 사용할 수 있는 공급업체가 제한될 수 있음. 철강 생산은 톤당 최대 2tCO_2로 온실가스 배출량이 높음. 세계경제포럼(WEF)에 따르면 철강 산업은 에너지 시스템에서 배출되는 전 세계 온실가스 배출량의 7%를 차지하며 이는 전 세계 항공, 해운, 화학 부문의 배출량을 합친 것과 같은 수준임. 컨설팅 기업 McKinsey의 추정에 따르면 2030년까지 유럽의 이산화탄소 배출 비용은 톤당 100~200유로에 달할 것으로 예상됨. 철강 생산의 탈탄소화가 추진되고 있으나, McKinsey는 유럽의 철강 업계가 저탄소 기술로 전환하려면 2050년까지 최대 1,000억 유로의 대규모 투자가 필요할 것으로 추산함. WEF는 "저배출 철강 제품은 기존의 고배출 방식으로 생산된 철강 제품보다 20~50% 더 비싸고, 초도 공장의 경우 더 많은 비용이 소요될 것"이라고 전망함

저탄소 철강과 원자력

2016년 스웨덴의 전력회사 Vattenfall, 철광석 생산업체 LKAB, 철강업체 SSAB가 합작하여 시작한 HYBRIT 프로젝트는 석탄 대신 수소로 철광석을 환원하여 철을 생산하는 것을 목표로 함. 이 공정에서는 이산화탄소가 아닌 수증기가 부산물로 생성되므로 철강 생산과 관련된 탄소 배출량을 크게 줄일 수 있음. 스웨덴의 전기는 주로 원자력을 포함한 저탄소 에너지원으로 생산되기 때문에 전기분해를 통해 수소를 생산하는 데 필요한 많은 양의 전기 또한 탄소 배출량이 매우 낮음. 이 프로젝트의 총 투자액은 20년간 약 400억 유로에 달함

철강 생산에서 탄소 배출을 줄일 수 있는 또 다른 방법은 원자력 열과 전기를 사용하는 것임. 철강 생산에 필요한 에너지의 양은 비용의 20~40%를 차지하므로 에너지 비용을 조금만 줄여도 상당한 경제적 이득을 얻을 수 있음. 현재 철강 생산의 75%는 탄소 집약도가 높은 고로(blast furnace, BF)/기본산소로(basic oxygen furnace, BOF) 방식을 통해 이루어지고 있으며, 나머지는 전기아크로(EAF) 방식을 통해 이루어지고 있음. EAF 방식을 통한 생산은 2050년 전체 생산량의 50%까지 증가할 것으로 예상됨. 전기아크로는 고철, 고로 쇳물 또는 직접 환원철의 다양하게 조합하여 넣은 다음 큰 전류를 흘려서 녹임. 대형 EAF에는 175MW의 전력이 필요하며 일반적으로 한 부지에 두 개의 용광로가 있음. 이 전력은 소형모듈원자로(SMR) 또는 기존 상용 원자로에서 공급할 수 있음. 이에 따라 탈탄소화를 모색하는 철강 제조업체들이 원전에 투자하기 시작함. 2022년 4월 미국 철강 제조업체 Nucor Corporation은 SMR 개발업체인 NuScale Power에 1,500만 달러를 투자하겠다고 발표했고, 2022년 11월 다국적 철강 제조업체 ArcelorMittal 또한 SMR 개발업체인 TerraPower에 2,500만 달러를 투자한다고 밝힘. 2023년 초에는 철강 제조업체인 Outokumpu와 북유럽 전력 공급업체인 Fortum이 양해각서를 체결하고 SMR 사용을 통한 Outokumpu 철강 생산 시설의 탈탄소화를 검토하기로 함

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

기타 금속 및 합금

원전 건설 프로젝트에는 강화된 물리적 특성, 향상된 부식 방지, 고온 또는 혹독한 조건에 대한 내성 등 특별한 특성이 요구되는 경우가 많음. 크롬, 니켈, 몰리브덴 또는 망간이 첨가된 탄소강이나 다양한 합금이 사용됨. 다음 기본 금속은 비교적 흔한 원자재이나 원자력 산업에서 사용할 경우 특수 합금으로 만들어야 함

- 지르코늄: 지르코늄은 매장량 기준으로 11번째로 풍부한 원소이며, 지르코늄 합금은 원자로 재료 중 가장 중요한 재료 중 하나임. 내식성뿐만 아니라 우수한 핵연료 적합성을 가지고 있어 노심 구성요소의 주요 재료로 사용됨. 예를 들어, Candu 노형 원자로에서는 지르칼로이-2(Zircaloy-2) 합금이 칼란드리아(calandria)와 압력관에 사용됨. Candu 연료 피복, 가압경수로(PWR)의 연료 클래딩에는 부식 속도가 느리고 수소를 흡수하는 경향이 적은 지르칼로이-4 합금이 사용됨
- 니켈: 니켈 합금은 용광로 또는 터빈 피팅과 같이 강도, 내크리프성(creep resistance), 내산화성이 요구되는 전력 시스템의 초고온 응용 분야(600°C 이상)나 원자로 냉각수 시스템과 같이 수성 부식, 특히 국부 부식에 대한 저항이 중요한 환경에 사용됨. 원자력 산업에서 니켈 합금이 가장 널리 사용되는 분야는 PHWR 또는 PWR의 증기 발생기 배관임
- 구리: 전기 전도도가 높기 때문에 전기 장비에서 중요한 역할을 함. 또한 높은 열전도율, 우수한 기계적 특성, 다양한 환경에서의 내식성으로 인해 전력 산업에서 열교환기에 중요한 재료로 사용됨
- 티타늄: 티타늄 합금은 무게 대비 강도가 높아 콘덴서 튜브, 판형 열교환기와 같이 높은 내부식성이 요구되는 분야에서 수요가 높음

희토류

소수의 희토류 원소가 원자로에 사용되며, 주로 원자로 제어봉에 사용됨

- 사마륨-149(Samarium-149): 원자로 제어봉에 첨가되는 강력한 중성자 흡수제
- 유로퓸(Europium): 녹는 점이 매우 낮으며 우수한 중성자 흡수제
- 가돌리늄(Gadolinium): 중성자 방사선 촬영 및 원자로의 차폐에 매우 효과적이며 합금의 내구성을 향상
- 디스프로슘(Dysprosium): 열 중성자 흡수 단면적이 커 원자로의 제어봉을 만들 때 활용되며 방사선 선량계에도 사용
- 홀뮴(Holmium): 모든 원소 중 자기 강도가 가장 높기 때문에 인공적으로 가장 강한 자기장을 만드는 데 사용됨. 핵분열로 생성된 중성자를 흡수할 수 있기 때문에 원자로를 제어하기 위한 가연성 독물로 사용되기도 함

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

희토류 원소는 아니지만 지르코늄과 함께 자연적으로 발견되는 하프늄(Hf)은 더 희귀한 원소인 유로퓸을 제어봉에서 대체할 수 있음. 희토류 매장량이 가장 많은 국가는 중국으로, 전 세계 공급에서 지배적인 역할을 하고 있음. 중국 외에 매장량이 많은 국가로는 베트남, 브라질, 러시아 등이 있음

붕소

원자로는 붕소-10 동위원소의 중성자 흡수 단면적이 높기 때문에 붕소강, 탄화붕소, 티타늄-붕소 합금을 사용함. 이 동위원소에 농축된 붕소는 반응성 제어 및 비상 정지 시스템에 사용됨. 붕소는 붕규산 제어봉의 형태로 또는 붕산으로 두 가지 기능을 수행할 수 있음. 가압경수로(PWR)에서는 연료 재장전을 위해 원전을 정지할 때 붕산을 원자로 냉각수에 첨가함. 그런 다음 핵분열성 물질이 모두 소진되고 연료의 반응성이 낮아지면서 수개월에 걸쳐 천천히 여과됨

흑연

흑연은 중성자의 속도를 줄이고 핵반응이 지속될 수 있도록 하는 감속재 역할을 함. 현재 운전 중인 대부분의 원자로에서 감속재는 물이 사용되지만, 개량형가스냉각로(AGR), 흑연냉각경수로(LWGR), 고온가스냉각로(HTGR)과 같은 일부 원자로에서는 흑연이 사용됨

광물 원자재 전망

러시아의 우크라이나 침공으로 인해 모든 에너지 원자재 가격이 급등했음. 원자재 가용성에 영향을 미치는 글로벌 요인은 러·우 전쟁뿐만 아니라 다른 국가에서도 발생함. 예를 들어 인도네시아 정부는 2024년에 주석 수출을 금지할 계획이고, 칠레에서는 일부 천연자원의 국유화가 논의 중임. 또한 멕시코에서는 2022년에 리튬 채굴 및 추출이 국유화되었으며, 페루에서는 채굴한 리튬을 시장 가치가 높은 제품으로 전환하도록 국가가 리튬 채굴 회사의 공장 투자를 요구할 수 있음. 라틴아메리카 지역이 전 세계 리튬 자원의 거의 60%를 보유하고 있다는 점을 감안할 때, 이러한 상황은 특히 리튬에 중요한 영향을 미칠 수 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

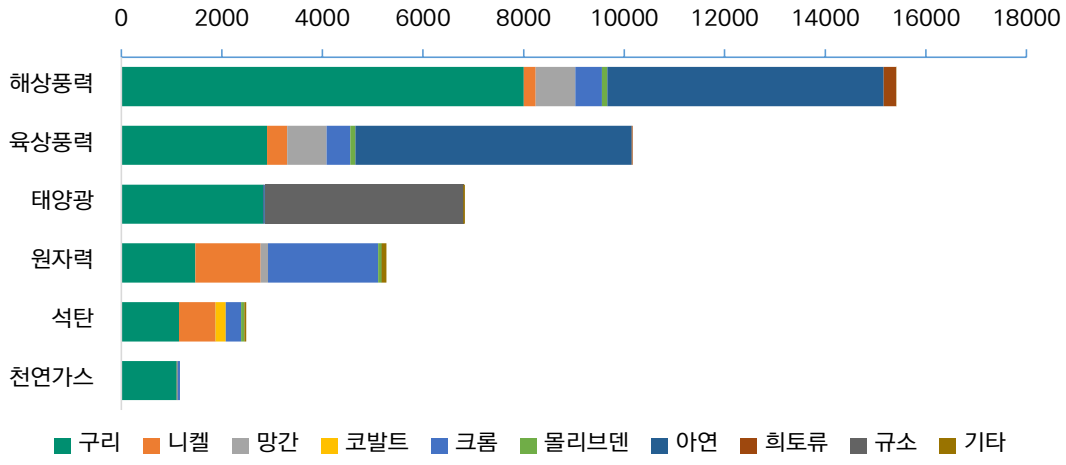
[표] 일부 광물의 3대 생산국 (2019)

광물	1위	2위	3위	1~3위 글로벌 공급 비중
구리	칠레	페루	중국	40% 이상
니켈	인도네시아	필리핀	러시아	50% 이상
코발트	콩고민주공화국	러시아	호주	75% 이상
흑연	중국	모잠비크	브라질	80% 이상
희토류	중국	미국	미얀마	80% 이상
리튬	호주	칠레	중국	85% 이상
백금	남아프리카공화국	러시아	짐바브웨	90% 이상

출처: IEA

청정에너지로의 전환이 가속화되는 가운데, 청정에너지 기술의 원자재 수요는 기존의 에너지 기술보다 현저히 높기 때문에 광물 수요가 크게 증가할 것으로 예상됨. 이는 청정에너지 기술 간의 자원 확보 경쟁으로 이어질 수 있음

[그래프] 발전원별 청정에너지 기술의 광물 수요 단위: kg/MW



출처: IEA

에너지 전환은 풍력발전 단지 등의 탈탄소화 인프라를 지원하기 위한 철강뿐만 아니라 구리와 니켈 수요에 중대한 영향을 미칠 것임. 2020~2050년 구리 수요는 지난 30년간의 두 배로 증가할 수 있으며, 니켈 생산량은 4배까지 증가할 수도 있음. 단기적으로 리튬 원자재와 코발트는 과잉 공급이 예상되는 반면 리튬화합물(lithium chemical), 배터리용 니켈, 주요 희토류 원소(예: 네오디뮴, 디스프로슘)는 공급이 제한될 수 있음. 기존 광산과 건설 중인 프로젝트의 예상 공급량은 2030년까지 리튬과 코발트 예상 수요의 절반, 구리 수요의 80%만 충족할 것으로 전망됨

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

3. 공급 현지화 및 글로벌화

많은 국가가 원자력 발전으로 전환함에 따라 현지화 프로그램을 추가하고 있으며, 원자력 공급망에 더 많은 기업이 추가될 것으로 전망됨. 엄격한 품질 관리 및 수출 통제 제도는 시장 진입을 제한할 수 있지만 경쟁 압력은 비용을 억제하는 경향이 있음. 공급의 현지화는 원전 도입 프로젝트 또는 프로그램에서 자국 및 현지 조달을 늘리는 과정으로, 주로 타깃 계약 전략이나 정부 이니셔티브를 통해 이루어짐. 공급의 글로벌화는 장비, 구성요소, 서비스를 국제적으로 경쟁력 있게 조달할 수 있는 공급망을 개발하는 과정을 뜻함

일부 프로젝트에서는 구매에 제약이 있거나 특정 조달 및/또는 공급업체 참여에 대한 장벽이 있을 수 있음. 여기에는 국제/지역 무역 협정, 제재, 수출 통제 조건(예: 원자력공급국그룹), 원자력 책임 프레임워크, 지적재산권 보호, 세이프가드, 운송 규정 등이 포함됨

[표] 원자재 유형에 따른 일반적인 공급망 관리 계획

원자재 유형	원자재 예시	일반적인 공급처	접근 방식	고려 사항
일상/정기 공급	• 일반 상업용 품목	• 현지 공급업체	• 시간과 노력 최소화	• 중기 계약 • 공급업체의 자체 사양 활용
병목현상	• 복잡한 사양의 제품 (예: 전자부품, 외부 서비스)	• 글로벌 공급업체 • 신기술을 보유하거나 용량에 제약이 있는 신규 공급업체	• 궁극적으로 다른 원자재 유형으로 전환 목표 • 핵심 품목의 공급 보장 • 전략적 관계 개발	• 장기 계약 • 공급업체가 양질의 서비스를 제공할 수 있도록 동기 부여 • 새로운 공급업체 또는 대체 제품 개발 검토 • 안정적인 공급을 위해 여유있는 재고 확보 • 적절한 경우 일반 사양으로 전환
레버리지	• 특정 토목공사 및 보조기기(BOP), 장비, 소모품	• 다수의 공급업체, 대부분 현지업체	• 주로 가격 중심의 관계 형성 • 혁신과 경쟁을 통해 비용 절감	• 단기 계약/포괄주문계약 • 공급업체가 가격 경쟁을 하고 있다는 사실을 인지하도록 함 • 적극적인 조달 정책 추구 • 지속적인 비용 절감 모색 • 총 비용을 절감하는 공급업체의 부가 가치 서비스 추구
전략적	• 대부분의 직접 상품(전략 품목, 고가 부품)	• 기존에 확립된 글로벌 공급업체	• 상호 이익이 되는 전략적 관계 및 파트너십 • 적극적인 관계 관리	• 장기 계약, 서비스 수명 계약 검토 • 제품 혁신 및 프로세스에서 공급업체와 긴밀히 협력 • 제품/프로세스 공동 설계 및 계획 • 통합 시스템 • 공급업체가 제품 및 서비스를 관리 • 비상시 계획 및 위험 분석

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

글로벌 공급과 현지 공급을 혼합할 경우 잠재적인 이점이 있음. 대부분의 원전 건설은 프로젝트와 각국 정부의 목표에 따라 글로벌 공급과 현지 공급의 수준과 정도가 다양함

[표] 글로벌 공급망과 현지 공급망의 장점 비교

글로벌 공급망	현지 공급망
• 다양한 공급업체. • 잠재적으로 더 높은 비용 경쟁력(저렴한 원자재, 에너지 또는 노동력에 대한 접근성 향상) • 더 높은 비용 확실성(이전의 경험 활용) • 더 높은 기술 표준에 대한 접근성 • 지방 정부의 지원이 필요하지 않음	• 납품 시간 단축 • 필요한 재고량 감소 • 현지 요구와 관습에 대한 대응력 향상 • 현지 언어, 규정, 표준에 대한 지식 • 현지 고용 혜택 및 기술 개발 • 국가의 부/번영 증대 • 물류 과정에서 더 간단한 검사/QA • 잠재적 리스크 감소(환율, 위조품, ESG, 지정학적 문제, 수출 통제, 오해 등)

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

프로젝트의 원자력 공급망에서 현지 조달을 장려하는 것은 잠재적으로 경제 발전을 위한 중요한 수단이자 미래의 국제 전략적 파트너십을 가능하게 하는 원동력이 될 수 있음. 현지화는 기술 이전을 지원하고 원전 도입 국가의 생산성을 높임. 현지 기업이 역량을 개발하고 국제 원자력 기업과의 관계를 발전시키면서 직간접적으로 특히 전문·숙련 직종의 고용을 창출함. 또한 현지 공급업체의 역량을 업그레이드하여 국제 시장에서 경쟁력을 강화하도록 지원함으로써 간접적으로 고용을 촉진할 수도 있음

현지화는 현지 기업의 생산성을 높이고 제품 포트폴리오를 가치사슬의 상단으로 이동시킴으로써 국가 경제 발전을 위한 프로젝트 투자의 일부를 확보하려는 시도임. 현지 공급 기지는 원전 운전 및 정비 기간 동안 보다 편리한 서비스를 제공할 수 있음. 원전 운영사의 예비 부품, 공급 소모품, 유지보수 조달 정책도 중요한 요소 중 하나임

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

현지화 경험

원전 산업에서는 자국 내 역량을 강화하기 위한 여러 성공적인 현지화 프로그램이 있었으며, 이는 특히 원전 공급에 있어 거의 완전한 현지화 역량을 갖추기 위해 노력한 공급업체가 있는 국가인 캐나다, 중국, 프랑스, 일본, 한국, 러시아, 미국 등에서 두드러짐. 최근 몇 년간 코로나19 팬데믹, 전 세계 물류 문제, 지정학적 요인이 비즈니스 환경에 미치는 영향과 시장 충격으로 인해, 현지화와 글로벌 공급의 균형은 원전 산업 공급망에서 중요한 화두가 되고 있음

[표] 주요국 원전 공급망 현지화 추진

국가	내용
프랑스	• 프랑스 정부는 자국 원자력 공급 산업의 발전을 자국(및 유럽) 자급자족은 물론 수출 주도 성장에 기여할 수 있는 중요한 목표로 삼고 있음 • 프랑스는 공급망 측면에서 거의 완벽하게 자급자족하고 있지만, 실제로는 국제 경쟁과 유럽의 공공 조달 규정으로 인해 조달이 점차 글로벌화되는 추세
일본	• 일본의 현지화는 1960년대 후반부터 통상산업성(MITI, 경제산업성의 전신)이 제조 및 건설 주계약자 역량을 포함한 '종합 엔지니어링 역량'을 구축하면서 추진됨 • 일본개발은행을 통해 재정 지원이 이루어졌으며, 일본 기업들은 수출을 위한 국제 파트너와의 협력과 합작투자를 포함하여 광범위한 역량을 개발 • 일본 산업계는 1970년대 말까지 원자력 발전소 부품의 완전한 국산화를 달성
한국	• 한국은 1979년 원전 건설에 대한 프로젝트 관리 및 공급업체 경험을 개발하기 위해 현지화 정책을 채택한 이후 40년간 국제적으로 경쟁력 있는 자체 원전 산업을 구축해왔음 • Westinghouse, Framatome과의 초기 턴키 계약을 통해 한국 업체들은 가압경수로 기술에 대한 경험을 쌓을 기회를 얻었음 • 월성 1호기의 경우 10%, 2호기의 경우 73%, 3·4호기의 경우 81%의 국산화율을 기록했으며, 2010년에는 한전과 포스코가 원자로 내부 및 연료 피복재용 합금 개발에 협력하기로 합의하며 국산 기자재 비율을 90%까지 늘렸음 • 한국의 국내 공급망은 한전이 UAE에서 4기의 APR1400 원전을 건설하는 주계약자로 선정되는 데 핵심적인 역할을 함
중국	• 중국에서 기술 공급업체와의 협력은 기술 이전과 현지화의 혼합을 중심으로 이루어짐 • 국가적 목표는 설계, 제조, 건설, 운전에서 자립을 달성하는 것이었으며 중국 업계 이해 관계자들의 현지화 목표는 국내 원자력 발전소의 100% 납품 능력을 목표로 함 • 이에 따라 1차측 건물과 터빈의 모든 주요 부품을 중국 내에서 공급하는 것이 목표 • 현재 중국 원자로의 국산화율은 CAP1000 92%, CAP1400 93.8%, HPR1000 87%, HTR-PM 93.4%, ACP100 90%임

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

최근 많은 국가들이 원자로 기술은 해외에서 조달하더라도 원전의 상당 부분을 자국이 공급할 수 있는 능력을 구축하려 노력하고 있음. 그러나 의미 있는 수준으로 자국 산업이 참여하려면 시멘트, 철강, 기계 및 장비, 화학 부문을 포함한 건설, 중공업, 제조업 역량이 필요함. 토목 공학, 품질 보증, 제어 및 테스트, 관리 기술을 포함한 전문 인력 교육 등 기타 서비스 분야에서의 숙련도도 요구됨. 이러한 발전은 글로벌 공급망과 산업 현지화 전략 간의 파트너십을 통해 추진할 수 있음

[표] 원전 건설·개보수 프로젝트의 현지화 계획

프로젝트	국가	운영사/공급업체	예상·목표 현지 조달률(%)
Atucha 3 Argentina 70	아르헨티나	Nucleoelectrica Argentina/CNNC	70
Rooppur 1&2	방글라데시	Bangladesh Atomic Energy Corporation/Atomstroyexport	최대치 목표
Ostrovets 1&2	벨라루스	Belenergo/Atomstroyexport	30
El Dabaa	이집트	Atomic Energy Authority/ Atomstroyexport	35
Paks 5&6	헝가리	MVM/Atomstroyexport	30-35
Jaitapur 1&2	인도	NPCIL/Framatome	최대
Kudankulam 3&4	인도	NPCIL/Atomstroyexport	45
Akkuyu 1-4	튀르키예	Atomstroyexport	〉37.5
Hinkley Point C	영국	EDF Energy/Framatome	64
UK SMR	영국	TBD/Rolls-Royce 주도 컨소시엄	80
Xe-100	영국	TBD/Xe-100	80
Olkiluoto 3	핀란드	TVO/Areva-Siemens	47
Sanmen 3&4, Haiyang 3&4	중국	SPIC/CNNC	80-90
ACP100 Lingong One	중국	CNNC	90
Loviisa (계속운전)	핀란드	Fortum	50
Bruce 3-8 (계속운전)	캐나다	Bruce Power/Candu	〉90
Darlington 1-4 (계속운전)	캐나다	OPG/Candu Energy	〉90
Pickering (계속운전)	캐나다	OPG/Candu Energy	〉90

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

방글라데시는 신흥 산업 경제국으로, 현지 기업들이 주로 보조기기(BOP), 1차측 건물, 2차측 건물 건설을 위한 자재 및 노동력 공급에 참여하고 있음. 인도 기업들도 원전 프로젝트에 참여하고 있으며, 원자로 공급업체인 Atomstroyexport는 운송, 부두, 인력용 주택 등 발전소 지원 인프라 대부분의 건설을 담당함. 그러나 산업적으로 성숙한 국가에서도 최대한의 현지화를 달성하지 못할 수도 있음. 예를 들어, 영국 산업계는 1995년 영국의 마지막 원전 신규 건설 프로젝트가 완료된 이후 원자력 부문 역량이 약화되어 제조 시스템을 업그레이드해야 하는 과제에 직면해 있음

현지화를 가장 적극적으로 추진한 국가들은 설계·건설·운전 부문에서 자립하기 위한 현지화를 추진함. 또한 현지화는 지역 경제를 발전시키고 고용을 창출하는 수단으로도 여겨짐. 그러나 현지화가 토종 원전 산업을 발전시키는 '만병통치약'은 아니며, 점점 더 상호 의존도가 높아지고 있는 국제 경제에서 가능한 모든 산업을 현지화하는 것은 경제적 이점이 거의 없는 경우가 많음. 경쟁하는 공급업체가 충분하다면 공급을 충분히 확보할 수 있고 가격 경쟁력에서 오는 이점을 얻을 수 있음. 미국의 경우 더 이상 원전의 모든 부품을 국내에서 조달할 수 없어 중단조품을 비롯한 여러 핵심 부품을 해외에서 수입해야 하는 국가이나, 전략적인 민관 협력을 통해 공급망 역량과 능력을 향상시키기 위해 노력하고 있음. 미국 에너지부(DOE)는 2022년 원자력 에너지 공급망 심층 평가에서 "첨단 원자력 기술의 새로운 도입을 위해서는 공급망의 새로운 영역을 구축하고 이러한 역량의 확장이 요구된다"고 밝힘

이집트에서는 El Dabaa 원전의 콘크리트 및 철근 콘크리트 구조물 설치 등의 직종에 현지 근로자를 대거 채용하기 시작함. Rosatom社의 이집트 지사인 RosSEM은 2023년 1,000명의 근로자를 고용하고 2,000명의 전문 인력을 채용할 예정이며, 건설 인력을 위한 교육 센터도 개소할 것이라고 밝힘. 원전 건설 기간 동안 현지 고용 인력은 최대 3만 명에 달할 것으로 예상됨

한편 건강과 안전을 보호하고 핵물질과 지식의 오용을 방지하기 위해 원자력 규제기관이 부과하는 인허가 요건은 원자력 부문의 국제 무역에서 주요 기술적 장벽으로 작용함. 일부 기술 공급업체는 여러 국가에서 원자로 노형에 대한 규제 승인을 획득했지만, 아직 전 세계 모든 곳에서 기술을 제공할 수 있는 공급업체는 없음. 일부 원자력 안전 규제 기관(예: 러시아 규제기관 Rostechnadzor)은 아직 외국 기술에 대한 승인 신청을 접수한 바 없음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

현지화 전략

공급망 현지화 전략은 투트랙 전략을 중심으로 구축하면 도움이 됨. 첫 번째는 EPC 계약업체, 관련 경제 개발 기관, 원전 운영업체가 협력하여 현지 조달을 늘릴 수 있는 기회를 파악하고, 입찰 전에 요건을 발표하여 현지 기업이 사전 자격을 갖추고 경쟁할 수 있는 기회를 제공하는 것임. 두 번째는 경제 개발 관련 정부기관이 현지 기업이 필요한 인증을 확보하고 사업을 준비할 수 있도록 역량 향상을 위한 보완 조치를 시행하는 것임. 원전 도입 프로그램의 준비 단계의 현지화 지원 방안은 다음과 같음

[표] 원전 공급망 현지화 전략 권고 사항

구분	내용
원전 도입 준비 단계의 현지화 전략	• 활용 가능한 분야와 지원이 필요한 분야를 파악하기 위한 종합적인 산업 조사 및 인력 계획 연구 수행 • 필요한 경우 공급업체가 학습하고 적응할 시간을 가질 수 있도록 규정 수립 가속화 • 현지 국가 기관/연구소 및 경험이 풍부한 원자력 분야 컨설턴트와 협력하여 원자력 용어, 표준, 규정, 국가 요건 및 고객 기대치에 대해 인력을 교육 • Tier 1~3 건설 및 장비 공급 계약에 구체적이면서도 실용적인 현지 조달 목표 포함 • 세부 장비/부품 사양의 제공이 원전 계약의 일부가 되도록 보장 • 현지 장기 공급 기반 구축을 위한 기술이전 조항을 검토
현지화 지원 방안	• 문서 관리 시스템 강화 • 회사 관리 개선을 위한 내부 자체 평가 • 원자력 안전 및 품질을 위한 조직 구축 • 목적에 맞는 문서 관리, 구성 • 자재 인증 추적성을 포함한 제조 공정의 추적성 확보 • 원자력 표준에 따른 특수 공정의 적격성 확보 • IAEA 지침을 이행하고 지속적인 피드백 및 교훈을 활용

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

[표] 현지화 기회가 있는 제품 및 서비스 분야

제품	서비스
• 철근을 포함한 토목공사 • 디지털화 및 시스템 효율화 (디지털트윈/2차측의 사전 예방적 점검 및 정비 분석) • 원자재 현지화 (화학물질, 윤활유, 기계 소모품) • 비(非) 원자력 등급 전자 장비 및 부품 • 보조기기(BOP)를 포함한 추가적인 플랜트 지원 시설 • 현지 인프라 (물류, 창고, 유통 등)	• 일반규격품목의 활용 (commercial grade dedication) • 정전 복구 서비스 • 장비 및 센서의 보정

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

4. 공급망 운영 및 최적화

고객, 자원, 비즈니스 리더십의 요구가 발전함에 따라 글로벌 공급망은 혁신적인 변화를 앞두고 있음. 공급망의 지속가능성과 민첩성(agility)을 우선시하는 것이 원자력 산업에서 경쟁 우위를 확보하는 데 핵심이 될 것임. 글로벌 원자력 시장은 새로운 공급업체와 신규 고객의 진입으로 진화하고 있음. 공급업체에 요구되는 높은 성능 기준으로 인해 기자재 시장에 진입하는 데 비용이 많이 드는 경우도 있음. 그럼에도 국제 시장에는 치열한 경쟁이 이루어질만큼 충분한 기술 공급업체가 존재함

중단조 및 특수 합금, 희토류 관련 생산 능력의 잠재적 병목 지점와 업계 숙련 인력의 은퇴는 건설 비용 추정치 상승에 기여함. 일부 지역에서는 노후화 및 기타 비기술적 요인으로 인해 특정 원자력 등급 원자재 및 하위 구성품에 대한 접근이 제약을 받고 있음. 2010년대 들어 몇몇 산업 국가에서 신규 원전 발주가 감소하면서 생산 능력은 더욱 약화되었음. 그러나 2020년경부터 신규 원전을 건설하기로 결정한 여러 국가와 산업체에서 신뢰가 쌓이고 있는 추세임. 공급업체가 지속적인 역량과 생산 용량을 적절하게 유지하려면 다음과 같은 핵심 영역을 유지 및 최적할 필요가 있음. 기술 공급업체는 자체 공급망을 구축해 왔고, 이러한 공급망은 반드시 독점적인 관계는 아니며 다양한 전략적 파트너십이 존재함

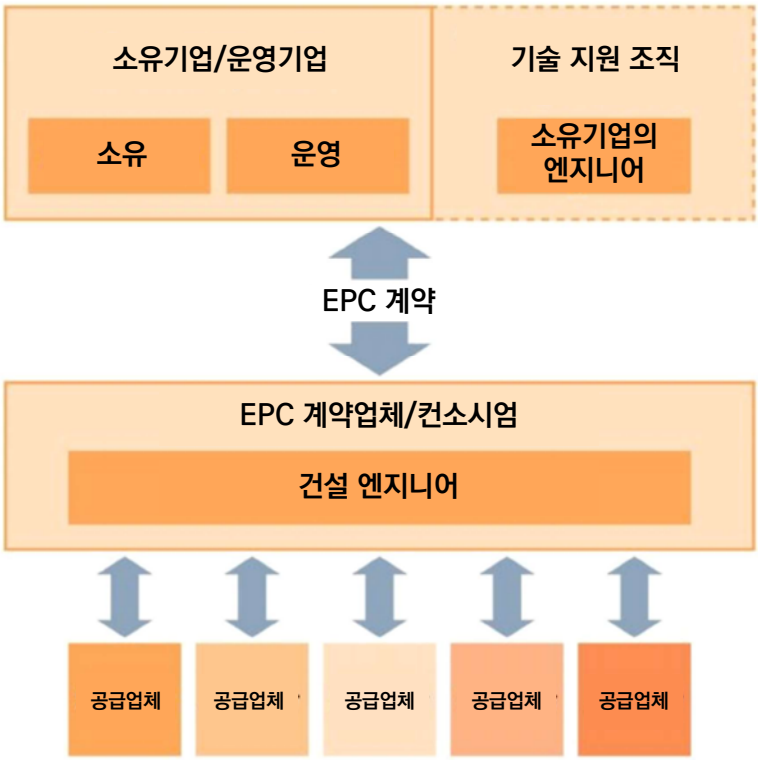
[표] 공급업체의 최적화 필요 영역

구분	내용
핵심 최적화 영역	• 잠재적인 병목 현상을 최소화하기 위한 역량 및 용량에 대한 투자 • 신규 공급업체의 경우 제조 및 건설 프로세스의 품질 보증에 대한 국제 표준 인증을 통해 시장 진입 능력 입증 필요 • 국가별 기술 규정 및 공급업체 요구사항의 조화 (가능한 경우 부분적인 조화) • 일부 장비, 프로세스, 조달 프레임워크의 표준화를 통해 보다 '린 경영'* 방식의 계약 모델과 공급망 참여 확대 *(lean management) 자재구매에서 생산, 재고관리, 판매에 이르기까지 전 과정에서 낭비요소를 최소화한다는 개념 • 원전 프로젝트 및 장비 납품의 관행과 프로세스를 최적화하기 위한 산업 혁신의 도입

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[그림] 일반적인 신규 원전 건설 프로젝트의 주요 공급망 상호작용



출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

원전 공급망의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있음.

- 원전 공급망은 수많은 조직을 아우르는 하위 공급업체로 구성되어 매우 광범위함. 즉, 요구사항을 연쇄적으로 적용하거나 공급망의 많은 부분을 통제하는 것은 매우 어려운 일임

- 개별 장비 공급에 관여하는 업체 중 원자력 관련 표준 또는 규정에 따라 관리 시스템을 유지하거나, 소유기업/운영기업에 의해 안전 등급 제품 또는 서비스를 공급할 수 있는 자격을 갖춘 '원자력 등급'으로 지정될 수 있는 업체는 극소수에 불과함. 장비 및 하위 장비 수준에서 원자력 산업 공급망의 대다수는 상업/산업 제조업체 및 서비스 공급업체 또는 주로 다른 산업 또는 여러 산업에 서비스를 제공하는 업체로 구성됨

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

- 공급망은 궁극적으로는 글로벌하지만 OEM에 직접 공급하는 공급업체의 경우 보다 현지화될 수 있음. OEM은 부품, 하위 어셈블리, 반제품 및 서비스를 현지 또는 적어도 같은 대륙에서 조달할 수 있음. 그러나 원자재와 개별 구성요소는 더 먼 곳에서 공급될 가능성이 높음. 공급망의 지역적, 글로벌적 특성은 지정학적 상황이나 대규모 산업의 변화로 인한 혼란이 안전에 중요한 제품과 서비스 및 일반규격품목의 공급업체들 사이에 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미함

- 원자력 시설의 구조물·계통·기기(Structure, System, Component, SSC)를 만드는 데 사용되는 소재가 원자력 전용인 것은 드문 경우임. 예를 들어, 솔레노이드 밸브 스프링에 사용되는 강재(X10CrNi18-8)는 일반적으로 최대 300°C의 응용 분야에 사용되며 자동차 산업의 나이프 및 고강도 시트에서도 찾을 수 있음. 또 다른 예시로는 널리 사용되는 오스테나이트 크롬-니켈 스테인리스강인 EN 1.4301이 있음. 이 소재는 성형성(formability)이 매우 우수하며 내식성이 뛰어나 석유·가스, 발전, 화학, 식품 등 다양한 산업 분야에서 사용하기에 적합함

공급망 관리와 책임

계약 입찰 자격을 갖춘 승인된 공급업체는 행동 강령(codes of conduct), 윤리, 품질, 보고 및 기타 비즈니스 고려 사항과 관련된 다양한 요건을 충족해야 함. 대부분의 원전 사업자와 공급업체는 자체 지침(예: 위조, 사기, 의심 품목에 대처하는 방법)과 서비스 계약 및 제품 보증의 일부로서 조달 프로세스 전반과 그 이후에 공급업체가 준수해야 하는 행동 강령을 보유하고 있음. 이러한 요건이 적용되는 품목 및 서비스의 예는 △QA 프로그램 △접근 권한 △하위 공급업체 관리 △공급 대체 △일반규격품목의 활용 △기록 △부적합 보고 △ID 표시 △보정 등이 있음

원자력 사업자와 공급망 간의 협력을 위한 여러 이니셔티브는 작업 관행을 최적화하고 조화를 개선하는 것을 목표로 함. 예를 들어, Candu Owners Group(COG)의 '공급업체 참여자 프로그램(Supplier Participant Program)'을 통해 공급업체는 강력한 안전 및 품질 문화를 달성하기 위해 국제적으로 인정받는 접근 방식을 공동으로 개발함. 공급업체 감독은 원자력 사업자가 개별적으로, 그리고 경우에 따라서는 미국의 NUPIC(Nuclear Procurement Issues Corporation)와 같은 협력 이니셔티브를 통해 제공하기도 함

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

협업 감사의 목적은 특정 위치 및/또는 시설에서 품질 보증(QA) 프로그램의 이행과 효과를 평가하는 것임. 감사 팀은 일반적으로 모범 사례를 공유하고 요구 사항에 대한 이해를 조화롭게 하기 위한 유틸리티 소속의 개인으로 구성됨

각국의 원자력 규제기관은 피허가자(licensee)가 국내 및 국제 관행에 따라 공급망을 관리하도록 보장하는 공급업체 감독의 핵심 이해관계자이기도 함. 또한 규제 기관은 여러 국제 포럼을 통해 협력하여 공급업체 감독에 대한 모범사례에 대해 합의하고 있음. 이러한 포럼에는 원자력규제활동위원회(Committee on Nuclear Regulatory Activities, CNRA)의 공급망 실무그룹(Working Group on Supply Chain, WGSUP), 다자간 설계평가 프로그램(Multilateral Design Evaluation Programme, MDEP)의 공급업체 검사 협력 실무그룹(Vendor Inspection Co-operation Working Group, VICWG), 서유럽 원자력 규제기관연합(Western European Nuclear Regulators Association, WENRA), IAEA의 소형모듈원자로 규제기관 포럼(SMR Regulators' Forum) 등이 있음

SMR 규제기관 포럼은 SMR 공급망 관리를 위한 피허가자의 역할과 관련하여 다음과 같은 조치를 제안한 바 있음

[표] SMR 공급망 관리를 위한 조치

구분	내용
피허가자의 역할	• 피허가자는 제품과 서비스를 안전하고 적시에 제공할 수 있도록 적절한 공급망 관리 체계를 구축할 책임이 있음 • 피허가자는 지능형 고객 역량을 제공할 수 있는 조직과 지원 관리 시스템을 모두 갖추어야 함 • 피허가자는 공급망의 모든 계층에서 공급업체와 계약업체에 적절한 원자력 안전 관행을 심어주어야 함 • 피허가자는 적절한 관행, 규정, 표준이 공급망 전체에 통합되도록 해야 함 • 피허가자는 보다 다양하고 새로운 잠재적 글로벌 공급망에서 발생하는 위험, 특히 위조, 사기 및 의심 품목(CFSI)으로 인한 위험을 식별하고 완화하는 방법을 입증해야 함 • 피허가자와 관련 공급망 조직은 보고, 협업 및 지속적인 개선을 장려하는 방식으로 부적합 사항을 관리할 수 있어야 함 • 피허가자는 안전 분류를 사용하여 구조물·계통·기기(SSC)에 적용되는 적절한 품질 요구 사항의 정당성을 뒷받침해야 함 • 피허가자는 공급업체의 사전 검증에 대한 책임을 져야 하며, 모듈식 설계, 제조, 시공 경험이 있는 공급망 회사라도 원자력 분야에 대한 경험이 없을 수 있음을 인식해야 함

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

원자력 공급망 혁신

원자력 산업에 혁신 기술을 적시에 도입하면 원자력 산업이 직면하고 있는 여러 가지 지속적인 과제를 극복하는 데 도움이 될 것으로 전망됨. 이러한 과제에는 다음과 같은 내용이 포함됨

- 프로젝트 일정의 확실성: 필요한 품질로 안정적으로 프로젝트를 완료할 수 있는 능력
- 경제성 및 비용 증가 관리: 이는 특히 서구권 국가의 신규 원전 건설 프로젝트에서 중요
- 파이낸싱 문제: 여기에는 환경·사회·거버넌스(ESG) 및 지속 가능한 금융 대상 프로젝트에서 원전 건설 프로젝트가 제외될 경우 발생하는 자금조달의 어려움 등이 있음
- 복잡하고 긴 국제 인허가 및 규제 프레임워크
- 원자력의 고유한 특성이나 가치를 인정하지 않는 불리한 정책과 시장
- 가변적인 재생에너지를 전력망에 통합하고 새로운 극한 기후에 적응하기 위해 전력망의 복원력과 유연성을 강화해야 할 필요성 대두
- 전력 생산을 넘어 수소 생산, 산업 공정열 공급, 담수화 등 새로운 시장으로의 확장
- 다른 분야에 비해 느린 일부 기술의 채택 속도

원자력 산업은 발전소 운영 개선을 지속적으로 추진하고 있지만, 엄격한 규제 환경으로 인해 일부 새로운 아이디어와 기술의 신속한 도입이나 상용화 효과에 있어 어려움을 겪는 경우가 많음. 따라서 다른 산업과 같은 속도로 발전하기 위해서는 혁신 도입 속도를 가속화하는 것이 최우선 과제임. 혁신을 성공적으로 도입하려면 다른 산업 분야의 기술을 도입해야 할 수도 있음. 난제를 해결하기 위한 혁신적인 변화는 다양한 형태로 나타날 수 있음. 공급망 전반의 혁신은 새로운 기술뿐만 아니라 사고의 다양성, 업무 관행, 규제, 자금 조달, 비즈니스 모델 및 커뮤니케이션에 대한 새로운 접근 방식을 포함해야 함. 혁신을 성공적으로 도입하려면 더 폭넓게 트렌드를 인식하고 전략적 위험을 감수하며 얼리 어답터가 될 수 있는 문화로의 변화가 필요할 수 있음

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

원자력 산업이 공급망을 최적화할 수 있는 혁신적인 관행 및 프로세스에는 다음과 같은 영역이 있음.

- 조달 프로세스 비용 절감: 이는 공급업체와의 관계를 강화하고 새로운 비즈니스 및 파이낸싱 모델을 도입함으로써 달성할 수 있음

- 부품·기자재 비용 절감: 전략적 조달 방법의 활용, 산업용 기성 부품의 사용 최적화 및 일반규격품목 활용, 원전 건설에 있어 혁신적인 제조·건설 기술 사용 등을 통해 부품 비용 절감

- 조달 요건 간소화: 기존 원전의 계속운전 및 관리 최적화, 신규 건설을 위한 기존 인프라 용도 변경(예: 석탄화력 발전소 부지 및 관련 인프라 활용), 원전 설계 및 운영 간소화

공급망의 많은 영역에서는 사업 개발을 위해 다른 공급업체 및 고객과 상호 작용하고 특정 제품의 기술 준비 수준(Technology Readiness Level, TRL)과 공급망 준비 상태를 향상시키는 활동을 지원하기 위해 공공 자금에 의존하고 있음. 또한, 향후 수십 년 동안 원자력 산업을 지원하는 데에는 새로운 공급업체와 다수의 중소기업이 필요함. 정부 및 공공 자금 지원 프로그램의 전략적 지원 없이는 향후 공급망에 더 심각한 문제가 발생할 수 있음

2021년 전 세계 공공 에너지 연구개발(R&D) 예산은 380억 달러 이상으로, 수년간의 감소세 이후 2017년부터 상승세로 돌아섰음[34]. 이러한 성장은 대부분 중국과 유럽이 주도한 반면, 북미에서는 에너지 R&D에 대한 공공 지출이 정체되었음. 그러나 1970년대 중반 이후 IEA 회원국의 에너지 R&D 투자는 점차 다양화하는 추세임. 1974년 전 세계 공공 에너지 R&D의 76%를 차지했던 원자력 에너지는 매년 줄어들어 2021년에는 22%로 감소했음. 2021년 원자력 에너지 공공 R&D에 가장 많이 투자한 두 국가는 미국과 일본으로 나타남

또한 원자력 산업과 공급망의 혁신은 원자로 기술 개발에만 국한된 것이 아니라, 산업 내에서 활용되는 다양한 기술과 프로세스에서도 이루어짐. 이러한 기술에는 로봇공학, 인공지능(AI), 디지털 서비스, 모듈식 건설을 위한 제조·건설 서비스 등이 포함됨

34) IEA, Energy Technology RD&D Budgets, 2022.10.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

[표] 다양한 원자력 공급망 혁신 기술

기술	내용
인공지능	• 머신러닝(ML) 및 심층신경망학습을 포함 • 방대한 양의 데이터를 처리하고 분석할 수 있으며, 고급 패턴 인식과 함께 어떤 일이 발생했는지(설명적), 왜 발생했는지(진단적), 앞으로 어떤 일이 일어날지(예측적), 어떻게 하면 그런 일이 일어나지 않게 할 수 있는지(규범적) 알아낼 수 있음 • 이를 통해 원자력 발전소 및 공급망 내에서 의사결정을 내리는 데 도움이 되는 예측 모델을 구축할 수 있음
사물인터넷(IoT)	• IoT를 통해 수집된 데이터는 시스템에 대한 포괄적인 이해를 제공하여 시스템을 지속적으로 제어할 수 있도록 지원 • AI와 결합하여 데이터 기반 의사결정 지원 가능
분산원장기술(DLT)	• DLT는 거래를 검증하고, 무단 액세스를 실시간으로 감지하고, 데이터를 추적하고, 온라인 데이터 전송을 안전하게 제공하는 데 사용할 수 있음 • IoT 기기와 결합된 블록체인 기술을 통해 소비자는 전력망에서 직접 에너지를 거래하고 구매할 수 있음
첨단 제조	• 첨단 제조 공정은 용접 및 접합 기술(예: 전자빔 용접), 적층 제조, 모듈형 제작, 콘크리트 재료 및 철근 혁신 등에 적용될 수 있음
디지털트윈	• 센서 데이터 수신, 모델 생성, 고급 시뮬레이션, 사전 지식 확보 및 예측을 통해 온라인에서 지속적인 모니터링을 지원
데이터레이크와 클라우드 컴퓨팅	• 클라우드 컴퓨팅은 개별 하드웨어와 소프트웨어를 사용하는 것보다 더 비용 효율적으로 계산 능력을 활용할 수 있으며, 서로 다른 위치에 있는 비즈니스 부서에서 데이터에 쉽게 액세스하고 데이터를 교환할 수 있음
사이버보안	• 무단 침입과 변조로부터 IT 시스템을 보호
자율주행 차량 및 로봇	• 안전을 개선하고 인건비를 절감하며, 특정 조건에서는 직원이 수행하기 불가능하거나 매우 위험한 작업을 수행할 수 있음

출처: World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

Ⅴ. 결론 및 시사점

원자력 공급망 전망

국가 체제 내 수출 통제는 경제적 고려 사항만큼이나 지정학적 고려 사항의 영향을 많이 받기 때문에, 어떤 경우에는 비교적 자유롭게 수출할 수 있는 부품과 기술이 다른 상황에서는 충분한 공식적인 설명 없이 수출 허가가 보류될 수 있음. 전체 핵연료주기를 아우를 수 있는 완벽한 현지 공급망을 유지할 수 있는 국가는 거의 없기 때문에, 자유무역 지역 내 수출 통제를 간소화하여 지역 단위의 공급망 현지화를 장려하는 것이 유리할 것으로 전망됨. 이를 위해서는 국제적 차원에서 더 큰 협력 이니셔티브와 공급망 격차에 대한 평가, 그리고 이러한 격차를 해소하기 위한 솔루션을 개발할 필요가 있음

기술 개발은 더 많은 기회를 제공함. 혁신적인 원자로 설계는 원자력 산업이 새로운 시장과 공급업체의 성장을 촉진하는 데 도움이 될 수 있음. 그러나 초도호기(FOAK) 프로젝트가 난항을 겪을 경우 다른 신규 원전 프로젝트도 저해하는 결과로 이어질 수 있음. 세계원자력협회(WNA)는 2030년대 초반까지 원자력 공급망이 다음과 같은 부문에서 성장 추세를 보일 것으로 전망함[35)]

- 일반 산업용 등급(industrial-grade) 품목의 활용
- 디지털화를 통한 예측 및 사전 예방적 점검과 유지보수 지원
- 의사결정을 위한 데이터 분석 및 지원 시스템(예: 디지털트윈, AI)
- 사업장 내 로봇공학, 드론, 자율 이동 시스템의 사용
- 사이버보안, 드론 대책과 같은 보안 조치
- 더 뛰어난 기능을 갖춘 고급 제조품
- 원전 프로젝트 내 모듈식 구조의 확대 및 품질 감독에 대한 합의
- 원전 건설에서 복합 콘크리트 구조물 사용 확대
- SMR 내 도입을 위한 설계별 안전조치 기술(예: 원격 감시, 센서)
- 전력 공급 이외의 용도를 위한 섹터 커플링 시스템 및 서비스
- 원전의 계속운전을 지원하는 원격 검사, 정비, 개보수 제품 및 서비스

35) World Nuclear Association, The World Nuclear Supply Chain 2023 Edition.

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

결론 및 시사점

2020년 이후 원자력 부문에 대한 전망은 크게 개선됨. 점점 더 많은 정부가 원자력이 안정적이고 비용 효율적으로 온실가스 넷제로 목표를 달성할 수 있는 해결책임을 인식하고 있음. 세계원자력협회(WNA)는 고성장 시나리오에서 2040년 원자력 발전 설비용량이 839GWe로 확대될 것으로 예상함. 이는 2040년 원자력 발전 설비용량을 777GWe로 전망한 국제에너지기구(IEA)의 「세계 에너지 전망 2022(World Energy Outlook 2022)」 보고서의 2050년 넷제로 시나리오(NZE)와 대체로 일치함. 이 수준에 도달하기 위해 신규 원전을 건설하는 데 필요한 자본 지출은 동종 차기 원전(NOAK) 건설의 연쇄 효과와 비용 최적화 실현 여부에 따라 9,000억~1조 8,000억 달러에 달함

GW급 원자로에 대한 필요성이 지속되는 가운데, 피동 안전 기능과 더 간단한 건설 및 자금 조달을 제공하고 산업용도 활용, 지역난방, 담수화 또는 수소 생산과 같은 열병합발전에 적용할 수 있는 첨단 설계를 포함한 소형모듈원자로(SMR), 초소형원자로(MMR)가 새롭게 주목되고 있음. 2020년대 말부터 이러한 기술에 연간 수천억 달러의 투자가 이루어질 가능성이 있음. 또한 인허가 연장을 통해 기존 원전은 최대 60년, 미국에서는 80년까지 운전할 수 있게 됨. 2040년까지 경제성, 배출량 감축 목표, 공급 안정성에 따라 최대 140기 이상의 원자로가 계속운전에 들어갈 수 있음. 계속운전 시장의 전체 규모는 500억~1,000억 달러를 초과할 수 있으며, 2040년까지 매년 약 30억~40억 달러의 국제 조달이 필요할 수 있음. 이미 영구정지에 들어간 원자로는 주로 유럽과 미국, 일본에서 원전 해체 및 폐기물 관리 부문에 장기적으로 중요한 시장 기회를 제공함. 2040년까지 전 세계적으로 최소 3개의 심지층처분장이 운영될 것으로 예상되며, 해체 및 폐기물 관리 시장 규모는 연간 60억~100억 달러에 달할 것으로 전망됨

원자력 산업이 현 상황에서 성장 기회를 포착할 것인지 여부는 수백, 수천 기의 원전을 효율적으로 건설하고 정비할 수 있는 역량을 비롯한 여러 요인에 따라 달라질 것으로 전망됨. 따라서 공급망 내에서 기술 및 산업 혁신의 잠재력을 실현하는 것이 향후 몇 년간 원자력 산업의 성공 요인이 될 것으로 예상됨. SMR을 산업화 및 양산하고 전력 생산 이외의 새로운 응용분야에 결합하는 능력은 이러한 최신 기술의 실현 가능성을 입증하는 데 있어 핵심이 될 것임. 첨단 제조, 고급 데이터 활용 요소를 포함한 디지털화 활용 또한 결정적인 역할을 할 것으로 전망됨

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

청정 원자력 에너지 인프라에 대한 장기적인 지원을 약속하는 과감하고 실용적인 정부 정책과 에너지 시장 활성화는 원자력 프로젝트에 대한 투자를 장려하는 데 필수적이며, 이는 원자력 공급망을 개발하고 적정 규모로 발전시키는 것을 뒷받침함. 원자력 공급망 역량에 대한 투자는 잠재적인 병목현상을 최소화하여 프로젝트 지연과 비용 초과를 방지하는 데 필수적임. 또한 신규 원전, 특히 소형 원자로의 다국적 인허가에 대한 간소화된 접근 방식을 가속화함으로써 국제 표준 원자로의 개발이 촉진될 것임. 이를 통해 더욱 견고하고 다양한 글로벌 공급망과 지식 기반이 구축될 것이며, 국제적인 협력과 글로벌 공급망 구축은 원자력을 사용하는 국가들의 혼란을 최소화하고 에너지 자립을 보장할 것임

국가별 기술 규정과 공급업체 요건을 조율하고 업계와 규제 당국의 협력을 강화하는 것은 인허가 및 공급망 감독 활동을 간소화하고, 프로젝트 간에 불필요한 규제 중복을 피하도록 하는 데 중요한 역할을 함. 이는 특히 SMR 장비 제조 감독, 장비 노후화 대응 전략과 같은 분야에서 조율하면 상당한 이점을 얻을 수 있음. 이와 더불어 조달 모델을 최적화하고 간소화하는 것은 공급업체가 프로젝트 입찰에 대한 시야를 넓히고 사업 제안에 참여할 수 있도록 하는 데 있어 핵심적인 부분이 될 것임. 표준화된 조달 프레임워크, 보다 간결하고 협력적인 계약 모델을 개발하면 원자력 프로젝트에서 공급망의 참여와 구매를 확대할 수 있음

원자력 프로젝트에 대한 투자를 장려하기 위해서는 원자력 에너지와 공급망의 지속가능성에 대해 금융업계를 교육하는 것이 필수적임. 이를 위해서는 원자력 공급망 기업들이 공급망에 ESG 원칙을 도입해야 함. 피허가자(Licensee)는 적절한 관행과 표준이 공급망 전체에 통합되도록 해야 함. 끝으로, 로봇공학, AI, 디지털 서비스, 첨단 제조, 모듈형 건설 서비스 등 원전 산업에 필요한 기술의 도입을 가속화하기 위해 정부 또는 공공/민간 연구 및 혁신 프로그램을 촉진하는 것이 필요함. 혁신적인 장비와 부품의 검증을 위해서는 테스트 시설에 대한 투자가 필요할 것임. 원자력은 경제 전체를 비용 효율적으로 탈탄소화할 수 있는 절호의 기회를 제공할 수 있음. 탄소중립, 에너지 안보, 지속 가능한 개발 목표를 달성하기 위해 필요한 속도와 규모로 원자력 발전을 확대하려면 글로벌 원자력 공급망에 대한 지속적이고 조율된 투자가 요구됨

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.

(우)05718 서울특별시 송파구 중대로 109, 대동빌딩 6층, 한국원전수출산업협회
Tel: 02-6284-8735 Fax: 02-3416-3951 www.e-kna.org

한국원전수출산업협회 KNA

copyright © 2024 한국원전수출산업협회. All right reserved.